FEBRERO 2010

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



BIOLOGIA
¿Se originó la vida en el fondo oceánico?

GEOLOGIA
Permafrost, metano y calentamiento global

MEDICINA
Pulmones lubricados, pulmones sanos

ARQUEOLOGIA
Cálculos astronómicos en la Antigüedad clásica

www.investigacionyciencia.es

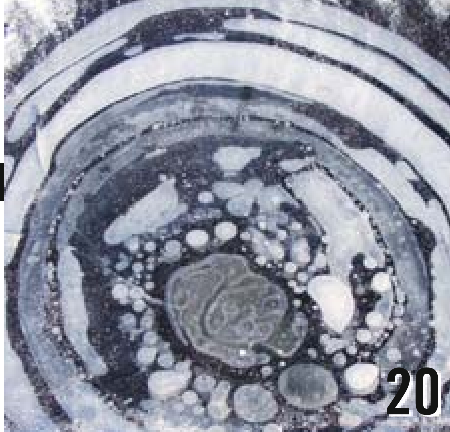
6,00 EUROS

ATP
Doble vida de una molécula



SUMARIO

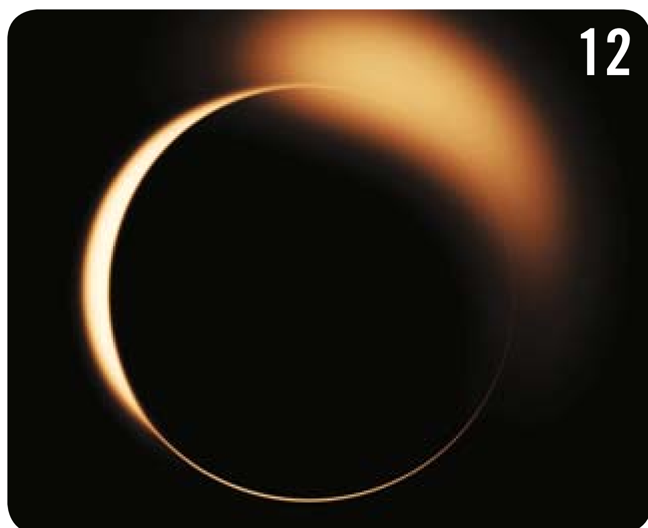
Febrero de 2010/Número 401



Burbujas de metano emergen en los lagos árticos.



La vida podría haberse originado en un entorno similar al de la Ciudad Perdida.



El perfil de un agujero negro dará mucha información.

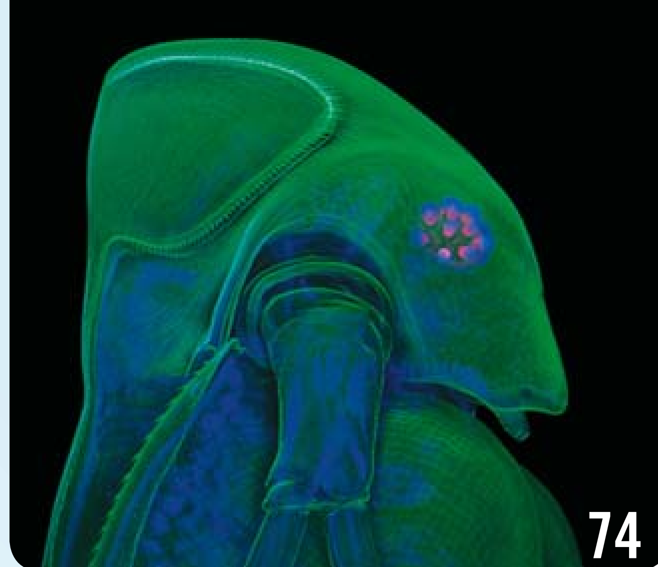


Los tensioactivos que secreta el epitelio alveolar reducen la tensión superficial.

ARTICULOS



Las señales del ATP resultan esenciales para el desarrollo del organismo.



La luz láser tiñe de verde el exoesqueleto de una pulga de agua.



El embalse de Flix, en Tarragona, sufre una acumulación notable de residuos.

SECCIONES

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
COORDINADORA DE EDICIONES Laia Torres Casas
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

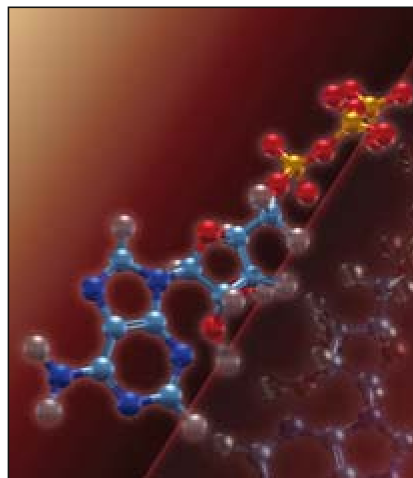
EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, John Rennie, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
VICE PRESIDENT, OPERATIONS AND ADMINISTRATION Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE AND GENERAL MANAGER Michael Florek

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ramon Pascual: *Retrato de un agujero negro*; Sònia Ambròs i Albesa: *Metano: una amenaza emergente*; Juan Manuel González Mañas: *Geoquímica de los humeros blancos*, *La doble vida del ATP*; Luis Bou: *El mecanismo de Anticitera*, *Apuntes*; M.ª Rosa Zapatero Osorio: *El telescopio Spitzer*; J. Vilardell: *Iluminar lo minúsculo, Hace...*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; Bruno Moreno: *La forma de los átomos*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Investigación y Ciencia

DISTRIBUCION

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Polvo meteórico. «La reciente ampliación de las investigaciones geofísicas al espacio cercano ha resaltado el hecho de que nuestra vida en la Tierra está protegida por la atmósfera. La muerte por 'impacto meteorítico' podría no ser un veredicto desusado de un juez de instrucción, si no fuera por el dosel protector de la atmósfera. Durante los últimos trece años me he ocupado en trabajos para obtener mediciones directas de la lluvia meteorítica. Las muestras de polvo meteorítico y de esférulas cósmicas [micrometeoritos] proceden de cimas de montañas elevadas, apartadas de la civilización industrial, y del fondo del mar. Los datos muestran ahora que, sobre la Tierra, cae material meteorítico en cantidades muy superiores (unos cinco millones de toneladas al año) a las estimadas en los comienzos. Además, parece que el ritmo de caída ha variado durante los últimos 10 o 15 millones de años.

—Hans Pettersson»

...cien años

Abono bacteriano. «El descubrimiento de la nitrificación y el mecanismo de fijación del nitrógeno atmosférico por las bacterias presentes en los nódulos de las raíces no tardó en desembocar en intentos de facilitar el proceso mediante la adición de bacterias fijadoras de nitrógeno. En 1895, Nobel y Hiltner patentaron un método para inocular guisantes, alubias y el suelo en que se cultivaban mediante el remojo de las semillas en una infusión de cultivo gelatinoso de las bacterias presentes en los nódulos de las raíces. En 1904, el Departamento de Agricultura de EE.UU. distribuyó 12.000 cajas de cultivos bacterianos, que al parecer produjeron buenos resultados. Pero el efecto de esos preparados es incierto. Aunque las bacterias nitrificantes proliferan de forma natural en el suelo, su crecimiento puede comprobarse por diversos medios.»

Riada. «La inundación de París hizo que muchas de sus calles se tornaran tan navegables como los canales de Venecia (*véase la ilustración*). La altura máxima alcanzada por el agua se dio en el Puente Real, con más de 10 metros sobre su nivel habitual. Desde la histórica inundación de 1615, París no había sufrido una riada como ésta. El agua ha desbordado cada margen hasta más de 1500 metros. No se ha revelado todavía la causa de la avenida. Algunos la explican aduciendo que la cuenca del Sena se había saturado durante un invierno suave, caracterizado por fuertes lluvias y poca evaporación. Será mas seguro aguardar la investigación de los ingenieros municipales.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CII, Nº 8, 19 DE FEBRERO DE 1910

La era del vapor. «La estadística ofrecida en fecha reciente por un diario alemán revela la pronta eliminación de los barcos de vela. En los veinte años de 1888 a 1908, el porcentaje de barcos de vela ha disminuido de 44,1 a 12,6 en la marina mercante de Gran Bretaña, de 62,1 a 19,1 en la alemana y de 80,7 a 30,0 en la estadounidense. Pero en la marina mercante de Francia el cambio no ha sido sino reducido: de 47,9 a 47,2 los porcentajes correspondientes.»

...ciento cincuenta años

Lo mejor desde... «A lo largo del último decenio la elaboración de pan ha sufrido una revolución. Para obtener el antiguo pan de fermento, se depositaba la masa en un lugar caliente hasta que empezaba a fermentar. Por un proceso químico el almidón se transformaba en azúcar, y luego en ácido carbónico y alcohol, que se formaba entre las partículas de harina y hacía que éstas se hincharan. Mas para que la operación no se malograra hacía falta un gran cuidado, por lo que el proceso moderno con levadura es claramente preferible. A lo largo del último decenio, para fabricar pan hemos contado con, además de levadura, 'polvos de hornear', 'harina leudante' y otros productos de naturaleza semejante; 99 familias de cada 100 emplean alguno de ellos.»

Un hombre realista. «En el Oeste se está rebasando lo nunca intentado en la construcción desmedida de ferrocarriles. Un hombre del Oeste que en su momento había sido comerciante, agrimensor, ingeniero, agente de fincas, presidente de un ferrocarril y político (en más de un partido, por mor de variedad), me comentó en cierta ocasión, acerca de una amistad común, un ingeniero, 'un buen teórico, señor, pero para sus planes se necesitan millones [de dólares]; puede que en Inglaterra le fuese bien, con un aporte ilimitado de dinero, pero no está diseñado para estas tierras del Oeste; ¡no es realista, señor, no es realista! ¡Aquí queremos hombres capaces de construir ferrocarriles de *mazorcas de maíz*, si hace falta!»



LA CIUDAD DE LA LUZ transformada en ciudad lacustre: París inundado, 1910

REPRODUCTORES DE SONIDO DIGITAL

La música portátil ha desestabilizado a la industria discográfica



Sony lanzó el Walkman —un reproductor portátil de casetes— en 1979. Con él les era posible a sus poseedores llevar la música que deseasen adondequiera que fuesen (se dice que el ingeniero Nobutoshi Kihara inventó el aparato para que Akio Morita, vicepresidente de la compañía, pudiera escuchar óperas durante los vuelos de muy larga distancia). Faltaban todavía veinte años para la revolución digital en la reproducción sonora de uso personal, cuyas consecuencias van mucho más allá tanto de lo personal como de la reproducción del sonido.

La música portátil se tornó digital en los años ochenta con la introducción de aparatos construidos en torno a los CD, los minidiscos y las cintas de grabación digital. En los años noventa, el Moving Picture Experts Group (MPEG) desarrolló un estándar que se convertiría en el MP3, un formato que condensa grandemente los archivos sonoros al eliminar sonidos imperceptibles (aunque los audiófilos más exigentes tienden a disentir de esa descripción).

En 1998 irrumpió en el mercado el MPMan F10 de Eiger Labs, el primer reproductor de MP3 que almacenaba música en una memoria ‘flash’ de nada menos que 32 megabytes, suficientes para una media hora de audio si no se quiere una calidad más alta. Le siguieron una serie de aparatos similares; los hubo que reemplazaron la memoria flash por discos duros compactos que contenían millares de canciones. El producto que realmente abrió brecha fue el iPod de Apple, en 2001. No era nada nuevo en cuanto a técnica, pero su diseño esbelto y armonioso, sumado a su espacioso disco de 5 gigabytes y su interfaz circular accionable con el pulgar resultaron decisivos. En nuestros días, los reproductores digitales pueden alojar no sólo música, sino también fotos, vídeos y juegos, y es cada vez más frecuente que vengan integrados ya en teléfonos móviles y en otros equipos.

Los MP3, intangibles y fáciles de copiar, liberaron de los surcos materiales en soportes de plástico o vinilo a la música. Supusieron un duro golpe para la industria discográfica, que durante largo tiempo se resistió a vender registros en MP3, lo que indujo a los melómanos a distribuir archivos por su cuenta. Según datos de la Asociación de la Industria de la Grabación de América (RIAA), las ventas de CD se hundieron a partir de 2000, cayendo desde más de 13.000 millones de dólares hasta unos 35.000 millones de dólares.

Entretanto, las descargas de música en formatos digitales saltaron desde 138 millones de dólares hasta mil millones en 2008. Pero según Russ Crupnick, analista de la firma NPD Entertainment, que los usuarios particulares compartan ficheros entre ellos, es decir, el intercambio P2P o *peer-to-peer* [entre iguales], supera en una proporción de al menos 10 a 1 a las descargas pagadas. Crupnick, al otear el porvenir, opina que la música no será cosa que se posea: la salvación de la industria, si la tiene, puede llegar del pago por la audición por la Red en *streaming* (es decir, bajo pedido pero sin descargar previamente un fichero).

—*Christie Nicholson*

BIOLOGIA

Diopsinas y protones



El uso experimental de opsinas microbianas —canales iónicos fotosensibles— ha desencadenado una revolución neurocientífica al posibilitar la modulación de la actividad de neuronas por medio de luz exógena. Ahora, Ed Boyden y sus colaboradores han examinado arqueobacterias, bacterias, plantas y hongos en busca de opsinas con propiedades hasta ahora desconocidas. Han encontrado un nuevo mecanismo para el control neuronal: el bombeo de protones impulsado por la luz. Los sistemas neuronales no usan de por sí protones para transportar la carga; sin embargo, el bombeo fotoimpulsado de protones por parte de la arqueodopsina-3 de *Halorubrum sodomense* interviene en una poderosa forma de silenciamiento neuronal basada en la luz azul. La aplicación de tales reactivos podría facilitar el cierre de circuitos neuronales por la luz; el propósito sería estudiar el papel de los circuitos neuronales en el comportamiento y en las patologías.

—*Nature*

Errata corrige

En el artículo “Resistencias antibióticas en la neumonía”, del mes de enero, en la página 10, donde dice que las bacterias existen en la Tierra desde hace 3,5 billones de años debería decir 3500 millones de años.

En el artículo “Energía sostenible: Objetivo 2030”, del mes de enero, en la página 24, se dice que el neodimio se usa en las cajas de engranajes de las turbinas eólicas: en realidad, se usa en algunos tipos de imán permanente de los generadores.

CORTESIA DE APPLE, INC. (*arriba*); © *iStockphoto*/ZIGA LISJAK (*abajo*)

GEOFISICA

¿A dónde va a parar el CO_2?

Los modelos teóricos propuestos sugieren que más del 40 por ciento del CO_2 producido por los combustibles fósiles va a parar al océano Antártico; las observaciones, en cambio, indican que sólo una escasa fracción del CO_2 queda allí retenida. Takamitsu Ito y sus colaboradores han utilizado un modelo del ciclo del carbono y de circulación de alta resolución para estudiar, en una escala temporal de dos años, los mecanismos que controlan el destino del carbono en el sumidero del océano Antártico. Según los resultados, el principal mecanismo de transporte del CO_2 antropogénico es el de Ekman (corriente de superficie impulsada por el viento); asimismo, se produce una compleja interacción entre el flujo de Ekman, los remolinos oceánicos y la subducción de masas de agua. El análisis revela conexiones estrechas entre la captura oceánica de carbono y la variabilidad del clima a través de la variabilidad temporal del transporte de Ekman.

—*Nature*



FISICA

Zitterbewegung

La ecuación de Dirac, enunciada por Paul Dirac en 1928 para describir el comportamiento de las partículas cuánticas relativistas, fusiona la mecánica cuántica con la relatividad especial. La ecuación predice una serie de peculiares efectos; entre ellos, un rápido movimiento vacilante, tembloroso, el "Zitterbewegung". La teoría está clara, pero la observación real del fenómeno resulta difícil. Christian Roos y sus colaboradores han desarrollado una simulación cuántica de la ecuación de Dirac por medio de un ion atrapado que se comporta como una partícula relativista libre. El elevado grado de control que se tiene en un experimento así sobre los parámetros del ion atrapado hace que resulte factible el estudio del Zitterbewegung y de otros ejemplos de manual de la física relativista cuántica.

—*Nature*

ELECTRONICA Y ROBOTICA

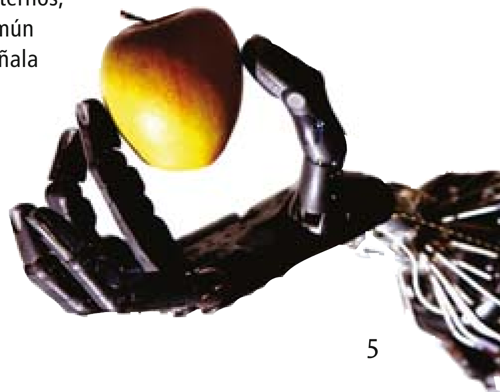
El robot multifunción

Los robots han demostrado ser instrumentos útiles en manos de soldados, cirujanos y empleados de la limpieza. Sin embargo, en cada uno de esos casos se trata de robots diseñados para tareas específicas. Se estudia ahora la construcción de máquinas polivalentes: robots capaces de navegar por entornos cambiantes, tales como oficinas o viviendas, y de trabajar con sus propias manos.

Por supuesto, la idea de robots polivalentes no es nueva. Hace ya unos 50 años que estamos siempre a cinco o diez años de realizarla, ironiza Eric Berger, codirector del Programa de Robótica Personal de Willow Garage, una nueva empresa de Silicon Valley. El retraso se debe, en parte, a que hasta las tareas más simples requieren un enorme conjunto de capacidades. Para traer un vaso, por ejemplo, el robot tiene que percibir los datos generados por una serie de sensores: láseres que rastrean para identificar posibles obstáculos, cámaras que buscan el objeto diana, retroalimentadores de fuerza en los dedos que agarran el vaso, entre otros. Sin embargo, Berger y otros expertos confían en lograr avances reales en la próxima década.

El problema, según Willow Garage, estriba en la falta de una plataforma común para una computación tan laboriosa. En vez de partir de las capacidades de una sola máquina, para diseñar robots y su programación se empieza siempre de cero. Con miras a adoptar un nuevo enfoque, Willow Garage está construyendo 25 unidades de su modelo PR2 ("Personal Robot 2"): una máquina con dos brazos que se mueve sobre ruedas dentro de una estancia para abrir y cerrar puertas o desenchufar aparatos. La empresa se quedará con diez de los robots, pero otros diez se entregarán a grupos de investigación externos; unos y otros pondrán en común sus logros. De ese modo, señala Berger, si se desea obtener el equivalente robótico de Twitter, no se empezará construyendo un computador, sino sólo la nueva facultad deseada.

—*Gregory Mone*



Sismología

El terremoto de Haití

A las 21:53 UTC (16:53 hora local) del 12 de enero de 2010 un terremoto sacudía Haití y destruía su capital, Puerto Príncipe. De acuerdo con el Servicio de Inspección Geológica de Estados Unidos, se trata del seísmo más importante de los sufridos por ese país pobre entre los pobres. *Nature* examina las causas y repercusiones de lo sucedido.

¿Qué lo causó?

La Española, o isla de Santo Domingo, comprende dos naciones: Haití en la mitad oriental, y República Dominicana, en la mitad oriental. La isla se encuentra en el borde septentrional de la placa tectónica del Caribe. La placa Norteamericana, mucho mayor, avanza en dirección occidental con respecto a la Caribe. En ese punto hay dos grandes fallas: el sistema de fallas septentrional, que atraviesa el norte de Haití, y el sistema de fallas de Enriquillo-Plantain Garden, en el sur. Todo indica que el seísmo se produjo en el segundo sistema de fallas, al que se debe casi la mitad del movimiento total entre las placas Caribe y Norteamericana: unos 7 milímetros por año, según el Servicio de Inspección Geológica.

¿A qué profundidad sucedió?

El daño causado por un terremoto guarda estrecha relación con la magnitud del mismo y con su proximidad a zonas densamente pobladas. El Servicio de Inspección Geológica calcula que la intensidad fue de 7.0, con el epicentro a una profundidad de 10 kilómetros. El Sistema de Vigilancia Sísmica Mundial, con sede en Potsdam, calcula una profundidad de 17 kilómetros y una magnitud de 7,2. En cualquier caso, se trata de un terremoto poco profundo, lo que acrecentó su peligro. Podría haber causado un movimiento del terreno de 1 centímetro, dice Richard Luckett, del Servicio Geológico Británico. En casos así, según Chris Rowan, de la Universidad de Edimburgo, el factor que de verdad cuenta es la calidad de las construcciones. Su precariedad en la hacinada ciudad de Puerto Príncipe ha contribuido seguramente a que la devastación haya sido tan grande.

¿Se produjo un tsunami por la acción del seísmo?

Al suceder en tierra, no era de esperar que el terremoto generase un tsunami. Sin embargo, a las 22:03 UTC se emitió una alerta de tsunami para todas las estaciones costeras en un radio de cien kilómetros del epicentro. El Centro de Alerta de Tsunamis del Pacífico, en Ewa Beach, Hawai, registró una ola de 12 centímetros en la ciudad de Santo Domingo. Decidió que no había peligro para las zonas costeras alejadas del epicentro; a las 23:45 se anuló el aviso. Todavía no hay un sistema de alerta propio de la zona, de ahí la intervención del centro de Hawai. En 2008, la Unesco esperaba que hubiese uno para 2010.

¿Era de esperar que el seísmo ocurriese?

Los científicos no se encuentran todavía capacitados para predecir con precisión cuándo se desencadenará un episodio. El equipo de Paul Mann, de la Universidad de Texas en Austin, viene observando la falla desde hacía años. En el Congreso Geológico del Caribe de 2008 señalaron que sus modelos arrojaban para la falla un ritmo de deslizamiento de unos 8 milímetros por año. Advirtieron de que esto, unido a que el último gran terremoto cerca de Haití fue en 1751, podría suponer "unos dos metros de déficit de tensión acumulado, lo que causaría un terremoto de magnitud 7,2 si hoy se liberase en un solo suceso".

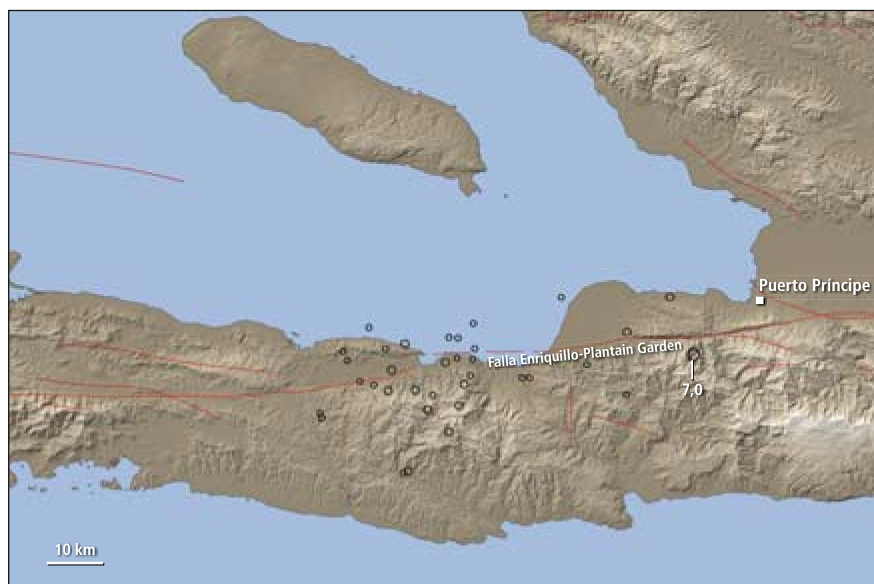
Eric Calis, miembro del equipo, le decía a *Nature* que "desgraciadamente, hemos dado en el clavo."

¿Guarda relación con otros terremotos recientes?

Se ha apuntado que el terremoto del 12 de enero podría estar ligado a otros ocurridos recientemente en el Pacífico; según esta hipótesis, una cadena de seísmos habría saltado sobre Centroamérica para golpear Haití.

Existen indicios de que un terremoto originado en un lugar lejano potencia el riesgo de ulteriores seísmos en otras zonas del mundo. El movimiento de una parte de una falla puede hacer que se acumule tensión en alguna parte de una falla que no se mueve. Sin embargo, en este caso no hay pruebas de que lo sucedido en Haití fuese desencadenado por un seísmo lejano, y la idea de que hay una cadena de terremotos que va de Haití a Indonesia es cuestionable.

Daniel Cressey (*Nature*)



Las líneas rojas indican líneas de falla; los círculos, seísmos, de mayor magnitud cuanto mayor sea el círculo.

JESSE ALLEN, NASA, OBSERVATORIO DE LA TIERRA

Posidonia y cambio climático

A partir de la composición isotópica de carbono y la producción foliar se ha reconstruido la historia de una pradera de posidonia en el transcurso de los últimos 1200 años

El cambio climático es una transformación de las características climáticas de nuestro planeta por causas naturales o, más recientemente, también por causas de origen humano. Al tratarse de un fenómeno que ocurre a lo largo del tiempo, los investigadores deben observarlo a escalas temporales distintas, de decenios a milenios, para aprehender, sin sesgos, la magnitud y el ritmo de los procesos implicados. Por este motivo, continúan recabándose datos que mejoren nuestra comprensión del fenómeno y suministren nuevos criterios para afrontar la situación.

Paleoclimatología

Para reconstruir el clima del pasado, o de cualquier otra variable ambiental, es necesario disponer de dos elementos fundamentales: un registro material, en donde se acumule y se conserve información (directa o indirecta) sobre la variable de interés, y una manera de extraer tal información. En otras palabras, necesitamos un "informe detallado" y una "clave" para descifrarlo.

Ese registro puede ser de origen abiótico (sedimentos lacustres u oceánicos, estalagmitas o casquetes de hielo) o biótico (turberas, corales, anillos de crecimiento de los árboles o conchas). Su formación y calidad se encuentran estrechamente asociadas a una estabilidad ambiental que garantice una acumulación continua y regular, y a una conservación a largo plazo. Los registros biogénicos requieren, además, de la participación de organismos bioconstructores.

Esa gavilla de requisitos son raros en los ecosistemas costeros, sometidos a intensas y frecuentes perturbaciones (oleaje y corrientes). Sin embargo, hallamos una excepción en las praderas submarinas de posidonia (*Posidonia oceanica*).

Posidonia, testigo del pasado

La planta vive predominantemente sobre suelos arenosos de aguas bien iluminadas, entre 1 y 30 metros de profundidad y a lo largo del litoral mediterráneo, donde es endémica. A diferencia de las algas, presenta tejidos y órganos (hojas, tallo, raíces, flor y fruto), que le permiten colonizar y fijar los fondos inestables, lo que frena la hidrodinámica litoral y, por ende, favorece la sedimentación.

Para compensar la sedimentación, evitar el enterramiento y asegurarse el acceso a la luz (en competencia con las plantas vecinas), posidonia presenta un lento (menos de un centímetro al año) pero continuo crecimiento vertical, que va aumentando el grosor del prado hasta formar una "mata", un depósito que guarda semejanza con las turberas terrestres.

La mata de posidonias es una matriz de sedimentos atrapados entre abundantes restos vegetales subterráneos y resistentes a la descomposición (sobre todo, rizomas, vainas foliares y raíces). Presenta una estructura cronológica coherente, de varios miles de años de antigüedad, por lo que constituye un registro privilegiado para el estudio y la reconstrucción del clima pasado en el Mediterráneo.

Con el fin de acometer la exploración e interpretación del registro, realizamos un sondeo en los sedimentos de una pradera de posidonia en la bahía de Portlligat (Gerona) mediante una plataforma perforadora y la ayuda de un submarinista. A lo largo de la cata de cinco metros, fuimos seleccionando abundantes restos de vainas foliares. Una vez "desenterrado el informe", nos dispusimos a descifrarlo.

Análisis isotópico

Se sabía que la composición isotópica del carbono de las plantas guardaba re-

MIGUEL A. MATEO

1. Pradera de posidonia. Se muestra la mata en un arrecife de barrera de unos tres metros de altura y unos 3000 años de edad en Es Pujols, isla de Formentera.





2. Detalle de los 25 centímetros superiores de la cata extraída de la mata de posidonia en Portlligat. Destaca la abundancia de fibra vegetal.

lación con su actividad fotosintética. En condiciones naturales, el carbono se encuentra en tres formas isotópicas: C_{12} (99 %), C_{13} (1 %) y C_{14} (trazas). El isótopo C_{13} difunde o reacciona en menor medida que el C_{12}, más ligero, durante cualquier transformación biogeoquímica, lo que acaba por determinar el enriquecimiento, o empobrecimiento, relativo de un isótopo frente al otro.

Cuando las plantas fijan carbono mediante la fotosíntesis, incorporan preferentemente C_{12}. Sin embargo, cuando la tasa fotosintética es elevada, disminuye la discriminación frente a C_{13}. Por tanto, un incremento relativo de C_{13} en los tejidos vegetales puede asociarse a tasas elevadas de fotosíntesis, lo que, a su vez, suele guardar relación con un aumento en la intensidad de luz que recibe la planta.

Para aplicar esa teoría al descifrado de nuestro registro, se llevó a cabo un experimento de sombreado bajo el agua en la bahía de Portlligat durante 4 meses (de marzo a junio). Se establecieron cuatro niveles de luz mediante pantallas de malla de sombreado (0, 50, 70 y 99 % de sombreado). La luz incidente en el dosel de las plantas se registró en continuo mediante sensores subacuáticos, emplazados bajo las pantallas. Se midió regularmente la producción foliar neta y se analizó la composición isotópica del carbono en las vainas foliares. Obtuvimos así la "clave" que nos permitiría descifrar el enigma paleoclimático: la relación entre la composición isotópica de posidonia, su producción y la luz recibida.

Mediante la aplicación de esa "clave" a la composición isotópica del carbono de los restos de vainas foliares procedentes de mata milenaria de posidonia, se ha reconstruido la historia de la luz subacuática y la producción de la pradera de posidonia en el transcurso de los últimos 1200 años. Los resultados muestran la ausencia de fluctuaciones notables o de cambios bruscos. Semejante estabilidad ambiental y biológica en el ecosistema de posidonia concordaría con la estasis del Holoceno reciente en la región mediterránea.

No obstante, se ha observado una leve tendencia al aumento del contenido en carbono, fruto, probablemente, del incremento atmosférico y a la par oceánico de dióxido de carbono. ¿Cuál fue la causa de esa contaminación, mil años antes de la revolución industrial? La deforestación. No cuenta sólo la cantidad de gases emitidos, sino también la cantidad que deja de sustraerse cuando desaparece la vegetación que los absorbe.

Pere Renom y **Miguel A. Mateo**
Centro de Estudios Avanzados de Blanes
CSIC

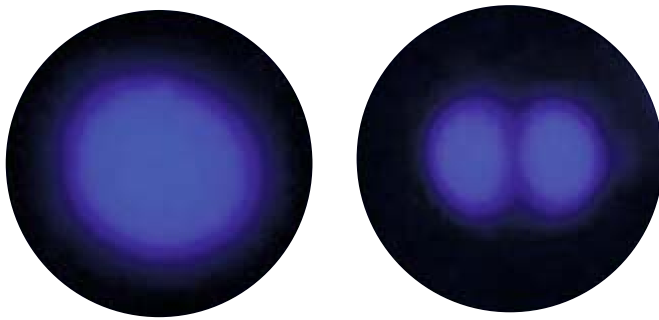
La forma de los átomos

Una nueva técnica permite representar la imagen de los orbitales electrónicos de átomos sueltos

Los libros de texto de química suelen incluir ilustraciones de átomos. Hay que matizar, sin embargo, eso de que ilustran "átomos". Los dibujos representan núcleos atómicos rodeados por orbitales electrónicos con forma de esfera difusa, o de mancuerna, o de trípode, etc., pero esas figuras representan la probabilidad de encontrar un electrón en tal o cual lugar en torno al núcleo más que una "forma" real. Ahora, en cambio, se ha conseguido representar en imágenes los orbitales electrónicos y mostrar por primera vez que, al menos en cierto sentido, los átomos realmente se parecen a esas imágenes de los libros de texto.

Igor Mikhailovskij y sus colaboradores del Instituto de Física y Tecnología de Kharkov, en Ucrania, han captado la imagen de los orbitales de los átomos de carbono gracias a la mejora de una vieja técnica de formación de imágenes, la microscopía de emisión de campo.

Formaron una cadena de átomos de carbono, la colgaron de una punta de grafito y la colocaron frente a una pantalla de detección. Al aplicar un campo eléctrico de miles de volt entre el grafito y la pantalla, los electrones fueron moviéndose, uno por uno, a través del grafito y a lo largo de la cadena de carbono, y así hasta que el campo eléctrico los arrancaba del último átomo de la cadena. Basándose en los puntos de la pantalla a los que llegaban, se sabía desde dónde habían abandonado su orbital en el último átomo. Las zonas "más densas" de las nubes de probabilidad tenían una probabilidad mayor de emitir un electrón, de forma que la información de muchos electrones generaba una imagen de las nubes. "Realmente, conseguimos imágenes de átomos sueltos", afirma Mikhailovskij.



Los orbitales de un átomo de carbono, vistos por un microscopio de emisión de campo.

Las imágenes se parecen a las que ofrecen los manuales, aunque sólo aparecen los orbitales exteriores, que envuelven a los orbitales internos y a los núcleos. Modificando la intensidad de la corriente, se cambiaba la energía del electrón más externo del átomo desde un nivel inferior hacia otro superior. Al hacerlo, la forma del orbital cambiaba de esférica a la de mancuerna, como predice la teoría. El grupo observó también electrones que pasaban espontáneamente de un estado a otro, por razones que no están claras, según Mikhailovskij, y formas más extrañas que podrían haber sido causadas por impurezas de átomos de otro tipo, por ejemplo de hidrógeno. Los resultados se pueden encontrar en el número de octubre de *Physical Review B*.

Ya habían obtenido antes otras imágenes de átomos individuales, con microscopios electrónicos de transmisión (que lanzan electrones a través de un objeto y miden las desviaciones que sufren) o microscopios de efecto túnel (que “palpan” la forma de la muestra con una punta electrónica). Sin embargo, así los átomos parecen poco más que manchones. En cambio, la microscopía de emisión de campo arranca los electrones del objeto que está siendo visualizado. Esta diferencia, afirma Alex Zettl, de la Universidad de California en Berkeley, quizá disminuya la probabilidad de que haya distorsiones y se produzcan errores de interpretación de la señal. “Es como oír hablar directamente a una persona en vez de a un traductor o intérprete”, afirma.

Además de confirmar las ilustraciones de los libros de texto, esta técnica podría elucidar las propiedades de las cadenas de átomos de carbono, que persisten, en buena medida, desconocidas. Se sospecha que podrían ser excelentes conductores, mostrar una gran fortaleza mecánica y ser útiles en los futuros ordenadores de escala atómica.

Davide Castelvecchi

Las algas rojas en el Mediterráneo

Estos organismos sencillos cumplen una función ecológica de gran importancia en las comunidades bentónicas

Las algas rojas (Rhodophyta) son organismos eucariotas y fotosintéticos, en su mayoría pluricelulares y marinos. Al igual que el resto de las algas macroscópicas (verdes, pardas y xantofíceas), son organismos sencillos, carecen de raíces, tallos y hojas, y suelen vivir fijas sobre fondos duros (rocas, conchas de moluscos, madera) o sobre otros vegetales. Sólo unas pocas especies crecen sobre fondos sedimentarios, fijas o libres sobre el sustrato. Aunque hay entre 1200 y 1300 especies de macroalgas en el Mediterráneo, se desconoce el número de algas rojas, una cifra sin duda superior a la de verdes, pardas y xantofíceas juntas.

Origen

Se cree que las algas rojas aparecieron en el planeta hace unos 1250 millones de años, puesto que los fósiles más antiguos identificados datan de ese período. En el Mediterráneo existen algunos representantes muy antiguos, que estaban ya presentes en el primitivo mar de Tetis, la gran masa oceánica que hace más de 60 millones de años se hallaba entre los



1. *Rissoëlla verruculosa*, una de las algas rojas resilientes del mar de Tetis.

DE “IMAGING THE ATOMIC ORBITALS OF CARBON ATOMIC CHAINS WITH FIELD-EMISSION ELECTRON MICROSCOPY,” POR I. M. MIKHAILOVSKIJ, E. V. SADANOV, T. I. MAZILOVA, V. A. KSENOFONTOV Y O. A. VELICODNAJA, EN *PHYSICAL REVIEW B*, VOL. 80, Nº. 16; OCTUBRE DE 2009 (*arriba*)

continentes de Laurasia y Gondwana, y a partir de la cual se formó el Mediterráneo. Algunas de esas especies son comunes en nuestras costas, como *Rissoëlla verruculosa*, que crece justo por encima del nivel del mar. Pero la mayoría de los vegetales del Mediterráneo, incluidas las algas rojas, proceden del océano Atlántico, puesto que el estrecho de Gibraltar constituye la única abertura natural que ha presentado el Mediterráneo durante millones de años (si excluimos el acceso al mar Negro).

Por otra parte, desde la apertura del canal de Suez, en 1869, han penetrado un gran número de especies procedentes del mar Rojo y del océano Indico; algunas de ellas se desarrollan y crecen bien en el Mediterráneo, sobre todo en la cuenca oriental (reciben el nombre de *especies lessepsianas* en memoria de Ferdinand de Lesseps, el ingeniero que ideó la construcción del canal). Por último, ya en fecha más reciente, diversas actividades humanas, como el cultivo de ostrones en las lagunas litorales de la costa francesa y el vaciado del agua de lastre de los grandes cargueros, están propiciando la introducción de especies procedentes de otros mares. Algunas de ellas (*Acrothamnion preissii* y *Asparagopsis taxiformis*) no sólo se han adaptado a vivir en el Mediterráneo, sino que además se han convertido en especies invasoras altamente nocivas para los ecosistemas autóctonos.



2. Gametangio femenino prolongado por una corta tricógina (teñido con azul de anilina) en *Neurocaulon foliosum*, una especie que medra en las profundidades.



3. Algas calcificadas bioconstructoras del coralígeno.

Pigmentación

Las algas rojas reciben este nombre por su color, que suele ser rojo, o rojizo, debido a la presencia en sus cloroplastos del pigmento rojo ficoeritrina. Poseen también otros pigmentos de diversos colores: clorofila *a* (pigmento verde indispensable para llevar a cabo la fotosíntesis oxigénica), carotenos y xantofilas (pigmentos amarillos o marrones que protegen del exceso de luz), y ficocianina y aloficocianina (azules), que, junto con la ficoeritrina, actúan como pigmentos antena y recogen los fotones de la "ventana verde" que la clorofila *a* capta con escasa eficiencia.

La combinación de pigmentos hace que, según la especie, el color de las algas rojas varíe entre el verdoso y los rosados, amarronados, púrpuras, lilas o negros. Asimismo, según la combinación de pigmentos que contienen, las algas rojas pueden soportar mejor o peor la irradiación solar: las especies fotófilas muestran afinidad por la luz; las esciáfilas huyen de ella (se refugian en las paredes oscuras, grietas o cuevas superficiales, o bien se desplazan hacia aguas profundas). Encontramos algas rojas desde la superficie hasta la profundidad máxima donde llega suficiente luz para mantener vida fotosintética (unos 110 metros en el Mediterráneo y 268 metros a nivel planetario). Sin embargo, cabe destacar que sin los pigmentos antena las algas rojas no habrían conquistado las profundidades, puesto que, de todos los pigmentos que contienen, sólo éstos captan eficientemente la luz dominante en aguas profundas.

Características celulares y reproducción

La diferenciación entre los tipos de algas tuvo lugar cuando aparecieron los primeros organismos eucariotas; ello implica que cada grupo evolucionó de forma independiente desde épocas muy tempranas. Por esa razón, las algas presentan numerosas diferencias básicas a nivel celular. Las algas rojas se distinguen, al margen de la pigmentación, por la estructura de los cloroplastos (dos membranas y tilacoides no agrupados), la sustancia de reserva (almidón de florídeas) y la composición de su pared celular (a menudo rica en agar y carragenatos). Además, la mayoría de las algas rojas suelen presentar unas estructuras densas que conectan las células (sinap-

sis) y que se encuentran sólo en las algas rojas y en algunos hongos relacionados con éstas.

Las algas rojas destacan también por la ausencia de células móviles y de cualquier estructura relacionada con los flagelos, como los centríolos. El hecho de que los gametos (femeninos y masculinos) sean inmóviles dificulta enormemente la fecundación. Como contrapartida, desarrollan gametangios femeninos dotados de una larga prolongación (tricógina) que les permite extender la superficie; ello aumenta la posibilidad de contactar con los gametos masculinos, que flotan en el agua, no nadan, y que al tocar la tricógina quedan adheridos a ella.

Las algas rojas presentan un ciclo biológico de tres generaciones, único entre los seres vivos. Una primera generación (gametofítica) es haploide (n) y produce gametos haploides por mitosis. Los gametos masculinos se emiten al agua mientras que los femeninos permanecen sobre el gametófito femenino. Una vez se ha producido la fecundación, se forma un zigoto diploide (2n), que, en vez de pasar al agua y desarrollar un nuevo individuo, se divide varias veces por mitosis dando lugar a una segunda generación diploide. Esa generación (carposporófito) vive de forma semiparásita sobre el gametófito femenino hasta su madurez. Cuando el carposporófito está maduro, emite esporas diploides (carpósporas) que, al fijarse al substrato y crecer, dan lugar a una tercera generación diploide (esporófito). El esporófito adulto formará esporas haploides por meiosis y éstas darán lugar a nuevos gametófitos, cerrando así el ciclo.

En determinadas especies, el gametófito y el esporófito presentan morfologías tan distintas que sólo el cultivo en el laboratorio permite relacionar las dos generaciones. Pero lo más interesante del ciclo es, sin duda, que las carpósporas corresponden a duplicados idénticos del zigoto, de manera que, a pesar de la dificultad de las algas rojas para fecundarse, con una sola fecundación se obtienen numerosos vástagos y se asegura la descendencia.

Ecología

Las algas rojas representan un aporte notable a la biodiversidad del Mediterráneo. Asimismo, las algas calcificadas incrustantes del orden Corallinales tienen una gran importancia ecológica: su pared celular impregnada de carbonato cálcico en forma de calcita les confiere dureza; algunas de ellas forman bioconcreciones en donde encuentran refugio numerosas especies vegetales y animales.

El coralígeno constituye la bioconcreción más común en el Mediterráneo; se desarrolla desde cerca de la superficie hasta entre 60 y 100 metros de profundidad, y alcanza unos 2 o 3 metros de altura; su crecimiento viene asegurado por las algas rojas calcificadas de su superficie. Cuando esas algas mueren, su esqueleto calcáreo es recubierto por nuevos individuos; con el tiempo se metamorfosea, originando una roca calcárea de estructura amorfa. Al crecimiento de esa bioconcreción también contribuyen los esqueletos calcáreos que dejan al morir los animales que viven en él.

Paralelamente, la estructura se va destruyendo a causa de la erosión del agua y de los organismos que excavan huecos, con lo que el coralígeno se halla en constante construcción y destrucción. Su crecimiento es lento. Las dataciones más antiguas cifran su antigüedad entre 7700 y 7800 años. Por otro lado, constituye el ecosistema más diverso del Mediterráneo, con una complejidad similar a la de un arrecife coralino, debido a las numerosas algas y animales que encuentran en él abrigo y alimento.

En cuanto a la utilización de las algas rojas, si bien existen numerosas especies de interés comercial (se utilizan sobre todo en alimentación y para la extracción de las substancias gelificantes de su pared celular), las mediterráneas suelen ser de tamaño reducido y poco abundantes, por lo que su explotación no resulta rentable.

Por fin, cabe remarcar que el conocimiento actual de las algas rojas mediterráneas es aún limitado a pesar de los numerosos estudios que se han realizado o se hallan en curso. Dado que las algas rojas constituyen un componente de suma importancia para la flora mediterránea, por su aporte a la biodiversidad y su función ecológica en las comunidades bentónicas, se están desarrollando numerosos proyectos científicos en pro del conocimiento y la preservación de este bien común.

Conxi Rodríguez Prieto
Departamento de Ciencias Ambientales
Universidad de Gerona

Retrato de un AGUJERO NEGRO

Avery E. Broderick y Abraham Loeb



EL AMENAZANTE DISCO OSCURO del agujero negro central de la Vía Láctea y el gas caliente atrapado por su gravedad, según unas simulaciones por ordenador (*arriba*). Una red de radiotelescopios empezará a observarlo este mismo año. El gas interestelar difuminará, sin embargo, los detalles más finos (*derecha*).





Gracias a una red mundial de radiotelescopios, pronto se observará la silueta de un agujero negro

Imaginémonos el anuncio siguiente: un técnico de telefonía móvil, de viaje al centro de la Vía Láctea, va preguntando por el camino si se le sigue oyendo. En el centro de la galaxia hay un gran agujero negro, Sagitario A* (Sgr A*), que pesa como cuatro millones y medio de soles. Cuando ese técnico se encontrase a menos de diez millones de kilómetros del agujero negro, le oiríamos hablar más despacio. Su voz, que nos sonaría más grave y débil, acabaría convirtiéndosenos en un susurro monótono y la señal se iría debilitando. Si además mirásemos, su imagen se nos volvería cada vez más roja y tenue; cuando estuviese cerca de la frontera —u "horizonte de sucesos"— del agujero negro, percibiríamos que el tiempo del técnico se "congelaría".

El propio técnico, sin embargo, no experimentaría un tiempo más lento. Tampoco vería nada extraño al llegar al horizonte de sucesos. Sólo sabría que habría cruzado el horizonte cuando nos oyera decir: "no, no le podemos oír bien". Sin embargo, no tendría forma de compartir sus últimas impresiones con nosotros porque ni siquiera la luz puede escapar de la atracción gravitatoria extrema del interior del horizonte de sucesos; es tan fuerte que, al minuto de que el técnico cruzara el horizonte, lo habría ya despedazado.

No podemos enviar a nadie a un viaje así. Pero se han creado procedimientos que, dentro de poco, generarán imágenes de la negra silueta de un agujero negro (en el sentido de "forma que presenta a la vista la masa de un objeto más oscuro que el fondo sobre el cual se proyecta"), recortada sobre un fondo de gas al rojo vivo.

¿Y todas esas observaciones de agujeros negros de que hablan los astrónomos, que aportan además un sinfín de imágenes? Son imágenes del gas —o de otro material— cercano a los agujeros negros o de emanaciones enormes de energía que, se supone, vienen de un agujero negro. Los agujeros mismos sólo serían, en tales imágenes, motas invisibles. Ni siquiera sabemos con certeza si realmente existen [*véase* "Estrellas negras", por Carlos Barceló, Stefano Liberati, Sebastiano Sonego y Matt Visser; Investigación y Ciencia, diciembre 2009].

Se han detectado objetos con masa suficiente y lo bastante pequeños para que, de creer en la teoría de la relatividad general de Einstein, sean agujeros negros. Se acostumbra hablar de ellos como si, en efecto, lo fueran (tal y como hacemos en este artículo). Pero hasta ahora no podemos decir si tienen la característica definitoria de un agujero negro: un horizonte a través del cual la materia puede fluir sólo en un sentido. No se trata de una curiosidad esotérica; los horizontes son el meollo de uno de los más profundos enigmas de la física teórica. Y las imágenes que nos mostrasen la silueta de horizontes de sucesos de agujeros negros nos ayudarían a conocer los extraordinarios fenómenos astrofísicos que los rodean.

Cuestiones importantes

Los horizontes de sucesos fascinan porque representan una contradicción fundamental entre dos de los pilares de la física del siglo xx: la mecánica cuántica y la relatividad general. La reversibilidad del tiempo constituye una característica esencial de la descripción mecanicocuántica de los sistemas físicos; cada proceso cuántico tiene un proceso inverso con el que, en principio, se recuperaría toda la información que el proceso original pueda haber desbaratado. Por el contrario, la relatividad general —que deriva la gravedad de la curvatura del espacio y predice la existencia de los agujeros negros— no admite procesos inversos que recuperen lo que haya caído en un agujero negro. La necesidad de resolver esta incongruencia entre la mecánica cuántica y la gravitación ha sido una de las principales motivaciones de los teóricos de cuerdas en su búsqueda de una teoría cuántica de la gravedad, una teoría que obtenga las propiedades de la gravitación como resultado de interacciones que obedezcan las leyes de la mecánica cuántica.

CONCEPTOS BASICOS

- Hasta ahora, sólo se han observado los agujeros negros indirectamente, por sus efectos gravitatorios en las estrellas y por la radiación que emite el gas caliente que cae en espiral hacia ellos.
- Se está adaptando una red de radiotelescopios para tomar imágenes de los agujeros negros supermasivos que se encuentran en el centro de la Vía Láctea y de la galaxia M87.
- Estudiar mejor los agujeros negros, amén de ayudar a explicar los fenómenos inusuales producidos por los agujeros, podría poner a prueba la teoría general de la relatividad e informar sobre la naturaleza de la gravedad en situaciones extremas.

CORTESIA DE AVERY F. BRODERICK

En un nivel más básico, convendría saber si la relatividad general de Einstein es realmente la teoría de la gravedad, incluso donde predice desviaciones radicales de la teoría clásica, la newtoniana. Una de tales desviaciones radicales nos la ofrece la existencia de los horizontes de sucesos. Los agujeros negros tienen la doble virtud de corresponder a soluciones muy simples de las ecuaciones de Einstein de la gravedad (con sólo tres números, la masa, la carga y la rotación o momento angular, se los caracteriza por completo) y de ser los lugares donde la gravedad se separa más de la teoría de Newton. Por ello, no hay lugar mejor que un agujero negro donde ver si la realidad se desvía de lo predicho por las ecuaciones de Einstein para condiciones extremas. Que así fuese nos informaría de la teoría cuántica de la gravedad. Por el contrario, si predijesen bien lo que ocurre cerca de los agujeros negros, se extendería el dominio donde sabemos que la relatividad general es válida.

Urge también responder las cuestiones astrofísicas relativas a lo que ocurre en las cercanías de los agujeros negros. La caída de gas y polvo alimenta los agujeros negros. La materia gana grandes cantidades de energía, a medida que se acerca al horizonte del agujero; produce entonces calor con una eficiencia veinte veces mayor que la fusión nuclear, el siguiente medio más potente de generar energía. La radiación del gas caliente que cae en espiral hace de las inmediaciones de los agujeros negros los parajes más brillantes del universo.

No podemos crear modelos perfectos del material en acreción porque desconocemos cómo pasa el flujo del gas de una órbita de radio grande a otra más ceñida al horizonte y acaba por caer en el agujero negro. Los campos magnéticos creados por las partículas cargadas en movimiento del flujo de acreción deben de condicionar en muy buena medida el flujo. Sin embargo, sabemos muy poco acerca de la estructura de estos campos y de cómo afecta a las propiedades observadas de los agujeros negros. A pesar de que las simulaciones por ordenador de la región de acreción cada vez son más factibles, a los teóricos nos siguen faltando muchos años para realizar verdaderos cálculos *ab initio*. Los datos de las observaciones inspirarán nuevas ideas y decidirán entre los distintos modelos.

Más embarazosa es la ignorancia acerca de los chorros de los agujeros negros. Las fuerzas que actúan en la vecindad de un agujero negro supermasivo se coordinan, de una u otra forma, para arrojar materia a velocidades ultrarrelativistas (de hasta el 99,98 por ciento de la velocidad de la luz). Estas increíbles emanaciones recorren distancias mayores que las propias galaxias; sin embargo, en su origen, cerca del agujero negro, son haces intensos tan colimados, que se enhebrarían en el sistema solar, mero ojo de una aguja galáctica. No sabemos qué acelera estos chorros a velocidades tan altas; ni siquiera sabemos de qué están compuestos: ¿de electrones y protones, de electrones y positrones, o principalmente de campos electromagnéticos? Para responder a estas y a otras preguntas resulta imprescindible la observación directa de gas que rodee a un agujero negro.

LA GUARIDA

La característica definitoria de un agujero negro es su horizonte de sucesos, la frontera esférica de la región de la que nada, a causa de la gravedad del agujero, puede escapar. El gas va acumulándose en un disco caliente y luminoso (el "disco de acreción") que orbita alrededor del agujero negro, con manchas brillantes transitorias similares a erupciones solares. Un disco puede ser delgado, como en la ilustración, abarcar un gran ángulo por encima y por debajo del plano de rotación o extenderse radialmente mucho más allá. Muchos agujeros negros supermasivos emiten chorros brillantes a una velocidad próxima a la de la luz.

Se cree que el borde interior del disco de acreción está cerca de una circunferencia que se denomina "órbita circular estable más interna": cualquier materia que se aventure más cerca del agujero se encontrará en una órbita inestable y se hundirá rápidamente en el agujero. La luz podría, en principio, circular alrededor del agujero negro de forma permanente; en la práctica, no obstante, la más mínima perturbación haría que cayese al agujero o partiese hacia el exterior.



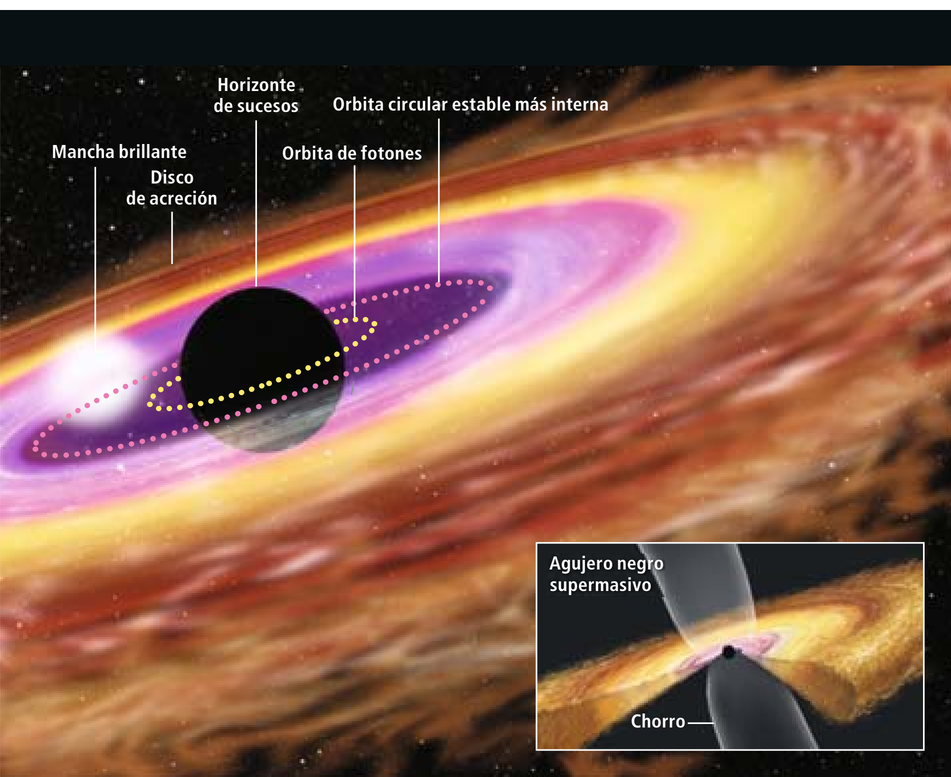
DON DIXON; JEN CHRISTIANSEN (*inserto*)

Los agujeros negros constituyen un lugar óptimo para comprobar si la gravedad, en condiciones extremas, se desvía de las predicciones de la relatividad general.

Acechar desde lejos

Desafortunadamente, estas observaciones son difíciles, por varias razones. En primer lugar, los agujeros negros son pequeñísimos según cualquier vara de medir astronómica. Parece que hay dos variedades principales: los agujeros negros de masa estelar, restos de grandes estrellas muertas, con masas de entre 5 y 15 soles, y los agujeros negros supermasivos de los centros de galaxias, que pesan desde millones de soles hasta diez mil millones de soles. El horizonte de sucesos de un agujero negro de 15 masas solares sería de sólo 90 kilómetros de diámetro, demasiado pequeño para discernirlo a distancias interestelares. Incluso un monstruo de mil millones de soles cabría cómodamente dentro de la órbita de Neptuno.

En segundo lugar, el pequeño tamaño e intensa gravedad de un agujero negro produce movimientos sumamente rápidos: la materia que esté muy cerca de un agujero negro de masa estelar completará una órbita en menos



de un microsegundo. Se necesitan instrumentos muy precisos para observar fenómenos tan rápidos. Y en último lugar, sólo resultan visibles los agujeros negros que, con grandes reservas de gas cerca, inducen una acreción a su alrededor, y ése es un subconjunto pequeño. Queda por descubrir la gran mayoría de los agujeros negros de la Vía Láctea.

Para abordar las dificultades planteadas, se ha preparado una variedad de técnicas que, a falta de tomar imágenes directas, proporcionan información sobre las propiedades y el comportamiento de la materia que orbita cerca de posibles agujeros negros. Se puede pesar un agujero negro supermasivo mediante la observación de estrellas cercanas a él, al igual que las órbitas de los planetas valen para pesar el Sol. En galaxias lejanas no se pueden observar una a una las estrellas cercanas a un agujero supermasivo, pero el espectro de su luz indica su distribución de velocidades, que da la masa del agujero. Tenemos al agujero negro supermasivo Sgr A* lo suficientemente cerca, en el centro de la Vía Láctea, para que los telescopios observen estrellas individuales en su proximidad; así se ha logrado la mejor estimación de la masa de un agujero negro hasta la fecha. Por desgracia, estas estrellas se encuentran muy lejos de la región que más nos interesa, la región donde comienzan a adquirir interés los efectos de la relatividad general.

Se busca también la huella de la relatividad general en la forma en que la radiación emitida cerca de un agujero negro varía con el tiempo. Por ejemplo, las emisiones de rayos X de algunos agujeros negros de masa estelar fluctúan en luminosidad de manera casi periódica, con períodos similares a los de las órbitas esperadas cerca del borde interior del disco de acreción.

Hasta ahora, la vía más fructífera para investigar los agujeros negros supermasivos aprovecha la fluorescencia de los átomos de hierro de la superficie del disco de acreción. El movimiento rápido del disco de acreción, que lleva consigo los átomos de hierro, y la fuerte gravedad del agujero se combinan para desplazar la longitud de onda característica de la fluorescencia y extenderla sobre una banda de longitudes de onda. Cerca de un agujero negro en rápida rotación, el disco de acreción gira más deprisa (porque, según la relatividad general, la rotación del agujero arrastra el espacio circundante); la emisión tendrá por ello una asimetría característica. Los satélites japoneses ASCA y Suzaku han observado emisiones conformadas así; se las considera indicios directos de la presencia de agujeros negros en rápida rotación, con velocidades orbitales de sus discos de acreción de hasta un tercio de la velocidad de la luz.

Sabemos la velocidad a la que rotan los agujeros negros de masa estelar gracias a los sistemas binarios formados por un agujero negro y una estrella ordinaria, separados entre sí una distancia corta, que permita que el agujero vaya absorbiendo materia de su compañera. Los análisis de los espectros de rayos X y de los parámetros orbitales de tales sistemas indican que los agujeros tienen entre un 65 y un 100 por cien de la máxima rotación permitida por la relatividad general para un agujero de una masa dada; una velocidad de giro muy alta parece ser la norma.

Los agujeros negros no sólo emiten luz (desde ondas de radio hasta rayos X) y chorros muy energéticos. Cuando dos agujeros negros chocan, crean en el espaciotiempo ondas gravitacionales que se propagan a la manera de las ondas que una piedra impulsa en un estanque. Para detectar tales ondulaciones del espaciotiempo se requieren instrumentos de una sensibilidad sutilísima. Los observatorios de ondas gravitatorias ya en funcionamiento, aunque no han hallado todavía ninguna, ofrecen una nueva y revolucionaria forma de estudiar los agujeros negros.

Una ventana con vistas

Aunque aportan mucha información, ninguna de las técnicas que hemos descrito hasta aquí nos ofrece imágenes del horizonte de sucesos de un agujero negro. Mas, gracias a muy recientes avances técnicos, la toma de una

Los autores

Avery E. Broderick y **Abraham Loeb** empezaron a colaborar en 2005 en el Instituto de Teoría y Computación, que Loeb ahora dirige, del Centro de Astrofísica Smithsoniano de Harvard. Broderick es actualmente investigador asociado del Instituto Canadiense de Astrofísica Teórica, en la Universidad de Toronto. Loeb, docente en la Universidad de Harvard, es también profesor visitante en el Instituto Weizmann de Ciencia en Rehovot.

imagen del horizonte de un agujero negro parece inminente. El retratado será el gigante de nuestra propia casa, Sgr A*. A una distancia de sólo 24.000 años luz, ocupa en el cielo un disco mayor que cualquier otro agujero negro conocido. Para que nos pareciera tan grande, un agujero negro de 10 masas solares debería hallarse a una centésima de la distancia que nos separa de la estrella más cercana. Y aunque hay agujeros negros supermasivos mucho mayores que Sgr A*, están a millones de años luz de distancia.

El tamaño aparente de la silueta de un agujero negro se duplica con creces porque la gravedad del agujero desvía sus rayos de luz. Aun así, el horizonte de Sgr A* parecería llenar solo 55 microsegundos de arco, como una semilla de amapola en Los Angeles vista desde Nueva York.

La resolución de los telescopios modernos, pese a su impresionante calidad, está limitada por la difracción, un fenómeno de la óptica ondulatoria que se produce cuando la luz atraviesa la apertura finita del telescopio. En general, para disminuir la menor escala angular resoluble por un telescopio hay que construir otro mayor o captar luz de longitud de onda más corta. A longitudes de onda infrarrojas (que, además, pueden atravesar las nubes de polvo que esconden Sgr A* en las longitudes de onda visibles), una escala angular de 55 microsegundos de arco requeriría un telescopio de 7 kilómetros de diámetro. Las longitudes de onda de la luz visible o la ultravioleta, más cortas, reducirían algo este gigantesco requisito, pero no lo bastante. Podría parecer que pensar en longitudes de onda más largas está fuera de lugar: las ondas de radio milimétricas, por ejemplo, requerirían un telescopio de 5000 kilómetros de ancho. Pero ya hay radiotelescopios del tamaño de la Tierra.

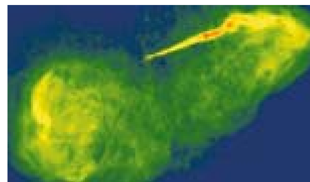
La interferometría de muy larga base (VLBI, de *Very Long Baseline Interferometry*) combina las señales detectadas por un conjunto de radiotelescopios distribuidos por todo el globo para lograr las resoluciones angulares que un radiotelescopio del tamaño de la Tierra alcanzaría. Dos conjuntos así de telescopios llevan funcionando más de diez años: el *Very Long Baseline Array* (VLBA, o Conjunto Interferométrico de Muy Larga Base), con antenas parabólicas en lugares de Estados Unidos muy lejanos entre sí —Hawai, New Hampshire—, y la Red Europea de VLBI (*European VLBI Network*, EVN), con parabólicas en China, Sudáfrica y Puerto Rico, así como en la propia Europa. En algunas películas —*Contacto, 2010*— se ve un sistema mucho menor, el *Very Large Array* [Conjunto Interferométrico Muy Grande], instalado en Nuevo México.

SEÑALES DISTANTES DE AGUJEROS NEGROS

Se cree que los agujeros negros —demasiado pequeños y lejanos para que los veamos— son responsables de diversos fenómenos: de las emisiones de rayos X a la expulsión de enormes chorros de materia de los centros de galaxias.



La galaxia Centaurus A, fotografiada en rayos X por el satélite Chandra, muestra un chorro de 13.000 años luz emitido por el posible agujero negro supermasivo que alberga. Los puntos parecidos a estrellas son agujeros negros de masa estelar que consumen materia de las estrellas vecinas. El rojo, verde y azul indican tres bandas de longitudes de onda de rayos X.



El agujero negro supermasivo que, se cree, hay en el centro de la galaxia M87 se halla rodeado por lóbulos de gas de 15.000 años luz de diámetro y dispara un chorro ultrarrelativista hacia nosotros. Un contrachorro invisible podría estar enviando material en dirección opuesta. El *Very Large Array*, en Nuevo México, tomó esta imagen en una longitud de onda de radio de dos centímetros. Los colores representan la intensidad de la señal.

Lamentablemente, el VLBA y el EVN valen sólo para longitudes de onda de radio de más de 3,5 milímetros, correspondientes a resoluciones de 100 microsegundos de arco o más, demasiado grandes para resolver el horizonte de Sgr A*. Además, a esas longitudes de onda el gas interestelar desdibuja la imagen de Sgr A* tal y como una densa niebla difumina la luz de las farolas. La solución es la utilización de un interferómetro de longitudes de onda más cortas, de milímetros o menos.

Estas longitudes de onda más cortas, sin embargo, sufren otro problema: la absorción por el vapor de agua de la atmósfera. Por esa razón, los telescopios milimétricos y submilimétricos se colocan en los lugares más altos y secos que se pueda, como la cima del Mauna Kea, en Hawai, el desierto chileno de Atacama y la Antártida. Dos ventanas útiles permanecen abiertas: a 1,3 milímetros y a 0,87 milímetros. Un conjunto de radiotelescopios del tamaño de la Tierra proporcionaría, a esas longitudes de onda, resoluciones de alrededor de 26 y 17 microsegundos de arco, respectivamente, suficientes para resolver el horizonte de Sgr A*.

Hay ya telescopios milimétricos y submilimétricos que se podrían incluir en el conjunto mundial: en Hawai, en el suroeste de EE.UU., en Chile, en México y en Europa. Debido a que se construyeron para otros fines, su adaptación para el VLBI entraña muchas dificultades técnicas. Necesitamos, por ejemplo, crear dispositivos electrónicos con un ruido bajísimo y grabadoras digitales de banda excepcionalmente ancha.

Sin embargo, un proyecto conjunto encabezado por Sheperd S. Doeleman, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, solucionó tales problemas en 2008. El grupo estudió Sgr A* a longitudes de onda de 1,3 milímetros con un conjunto de sólo tres telescopios, en Arizona, California y Mauna Kea. Tan reducido número de telescopios es insuficiente para generar una imagen, pero descubrieron en Sgr A* regiones brillantes de sólo 37 microsegundos de arco de tamaño, dos terceras partes del tamaño del horizonte. Telescopios adicionales deberían hacer posible la toma de imágenes de la silueta del horizonte de sucesos.

Según recientes observaciones milimétricas del VLBI, es muy improbable que Sgr A* no tenga un horizonte. Las acreciones en torno a un agujero negro y en torno a objetos sin horizonte difieren en un aspecto fundamental. En ambos casos, la materia en acreción acumula grandes cantidades de energía durante su caída. Sin horizonte, la energía se convertirá en calor allá donde esa materia termine por depositarse, calor que luego se emitirá en forma de radiación visible para los observadores

SCIENCE SOURCE (*Centaurus A*); OBSERVATORIO NACIONAL DE RADIOASTRONOMIA/FUNDACION NACIONAL DE LA CIENCIA (*M87*)

externos, con un espectro térmico característico. En cambio, el material que cae a un agujero negro transporta cualquier cantidad de energía a través del horizonte, tras el que quedará oculta para siempre.

La luminosidad total de Sgr A* nos sirve para calcular el ritmo al que cae el material de acreción. Las observaciones milimétricas del VLBI ponen estrechos límites al tamaño máximo del borde interior del flujo de acreción y, así, a la energía liberada por el flujo que cae hasta ahí. Si Sgr A* no tiene un horizonte (y por tanto no es un agujero negro), el excedente de energía debe ser irradiado cuando el material de acreción se para, principalmente en el infrarrojo. No se ha encontrado ninguna emisión térmica en el infrarrojo de Sgr A*, ni siquiera en observaciones meticulosas. La única manera de conciliar esta carencia con la inexistencia de un horizonte es que el material irradiara todo el exceso de energía a medida que se desplomaba hacia el interior, pero requeriría eficiencias de radiación absurdamente altas.

Retrato de un monstruo

Nos hemos empeñado, como otros teóricos, en predecir lo que se verá cuando la VLBI produzca imágenes de Sgr A* en los próximos años. Un agujero negro crea una silueta sobre el fondo de las emisiones producidas por el gas de acreción que lo rodea. La "sombra" surge porque el agujero negro traga los rayos de luz que venían hacia el observador desde detrás del agujero. Pero la región brillante en torno a la "sombra" se suplementa con ondas luminosas de detrás del agujero negro: un poderoso efecto de lente gravitacional desvía los rayos de luz de manera que incluso la materia que está justo detrás del agujero negro contribuye a la luz de los aledaños de la región oscura. La silueta resultante es el "retrato del agujero negro", una imagen donde el agujero aparece realmente en negro.

La sombra no será un disco circular, sobre todo por las extremas velocidades orbitales del gas, que se aproximan a la velocidad de la luz. Las emisiones de una materia que se mueve a tales velocidades están desplazadas por efecto Doppler y se concentran en un estrecho cono en la dirección del movimiento: la emisión resultará más brillante por el lado del gas que, en su rotación, se nos acerca y más atenuada por el lado que se aleja; no se vería, pues, un anillo brillante completo alrededor de una silueta en forma de disco, sino un arco. Tamaña asimetría desaparecería sólo si, por casualidad, estuviésemos observando a lo largo del eje de rotación del disco.

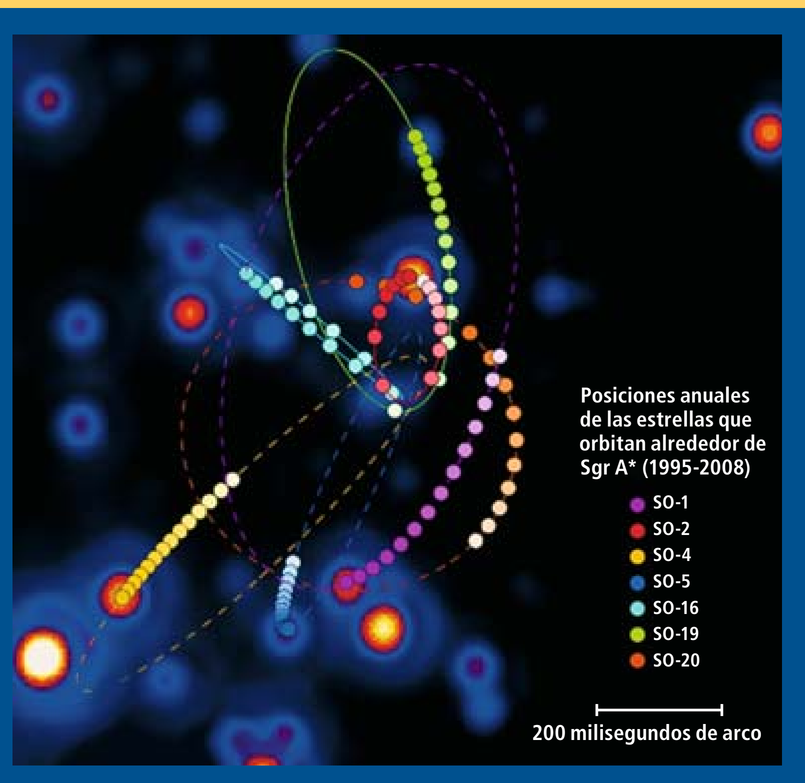
El propio giro del agujero negro, que puede tener un eje de rotación diferente del propio del disco de acreción, ejerce un efecto similar. Las imágenes de su silueta permitirán determinar la dirección del giro del agujero negro y la inclinación del disco de acreción con respecto a esa dirección. Igualmente importante para la astrofísica, los datos supondrán una valiosa aportación a la teoría de la acreción: establecerán de una vez por todas la densidad del gas y la geometría del borde interior del flujo de acreción.

Otros agujeros negros supermasivos deberían también caer dentro del alcance de la VLBI y podrían compararse con Sgr A*. Recientemente, hemos demostrado que el segundo mejor objetivo es el agujero negro que, según se cree, se encuentra en el centro de la galaxia gigante elíptica M87. Está a 55 millones de años luz de distancia y, hasta hace poco, se le atribuía una masa de unos tres mil millones de soles; su silueta tendría poco menos de la mitad del tamaño de la de Sgr A*. En junio de 2009, sin embargo,

Sgr A* es el único agujero supermasivo tan próximo a nosotros, que se pueda distinguir con un telescopio las estrellas que tiene más cerca.

ACERCARSE AL GIGANTE

Hasta hace poco, la mejor manera de que una observación se acercase al horizonte de sucesos del agujero negro Sgr A* consistía en estudiar el movimiento de las estrellas próximas al centro de la Vía Láctea. Sus órbitas (*líneas discontinuas*) demuestran que están sometidas a la atracción de un objeto de radio muy pequeño, con una masa de 4,5 millones de soles. Los puntos de color marcan las posiciones de las estrellas para cada año, entre 1995 y 2008. El fondo es una imagen infrarroja de 2008 de esos astros (y de otras estrellas). La estrella S0-16 es la que se acerca más a Sgr A* —a menos de siete horas luz—, pero incluso esta distancia sigue siendo 600 veces mayor que el radio del horizonte de sucesos.

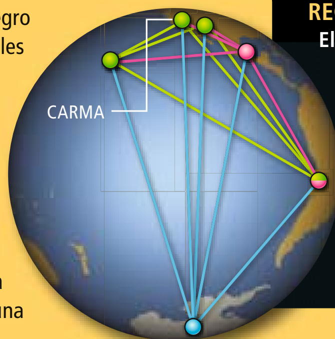


ANDREA GHEZ *U.C.L.A. Grupo del Centro Galáctico*; DATOS OBTENIDOS CON EL TELESCOPIO W. M. KECK

Imágenes del horizonte

Se están preparando varios conjuntos de radiotelescopios para formar una red global de observatorios (*derecha*) que pueda observar Sgr A* y su entorno inmediato a longitudes de onda de unos 0,87 y 1,3 milímetros. Ni la atmósfera de la Tierra absorbe demasiado la radiación de esas dos "ventanas", ni el gas interestelar la dispersa. El tamaño de la red permitirá observaciones con la resolución suficiente para producir imágenes del horizonte de sucesos de Sgr A*.

El aspecto que tenga Sgr A* dirá cuál es la orientación de su disco de acreción respecto a nuestra línea de visión; hará saber también la velocidad a la que gira el agujero negro. Son dos de las características esenciales del sistema de Sgr A* que aún debemos descubrir; resultan vitales para la comprensión de cualquier otra observación de ese agujero negro y su entorno (*abajo*). Cuando se enciende una mancha brillante en el disco de acreción, el efecto de lente gravitacional del agujero negro forma, en ocasiones, múltiples subimágenes de la zona (*página opuesta*). Si estas subimágenes tuviesen resolución suficiente, proporcionarían información detallada sobre el campo gravitacional cerca del agujero negro. Se sometería así la relatividad general a una prueba rigurosa.



RECOLECCION DE DATOS

El Conjunto Interferométrico Combinado para la Investigación en Astronomía de Ondas Milimétricas (Combined Array for Research in Millimeter-Wave Astronomy, CARMA; *arriba*), en Cedar Flat, California, es uno de los varios conjuntos interferométricos de radiotelescopios que se está preparando para observar el horizonte de sucesos de Sgr A*. Una red de observatorios de este tipo (*izquierda*), separados por distancias de miles de kilómetros (*líneas*), producirá, gracias a la interferometría de muy larga base, imágenes con resoluciones tan finas como las que ofrecería una antena de radio del tamaño de la Tierra. Cuatro conjuntos (*verde*) están listos ya para integrarse en un conjunto interferométrico más amplio, dos (*rosa*) se encuentran en desarrollo y al último (*azul*) sólo hay que adaptarlo a las observaciones en longitudes de onda submilimétricas.

Disco de acreción

Horizonte de sucesos

Simulación 1
Agujero negro sin rotación visto desde 30 grados por encima del plano del disco de acreción.

Simulación 2
Agujero negro sin rotación visto desde 10 grados por encima del plano del disco de acreción.

Simulación 3
Agujero negro en rápida rotación visto desde 10 grados por encima del plano del disco de acreción.

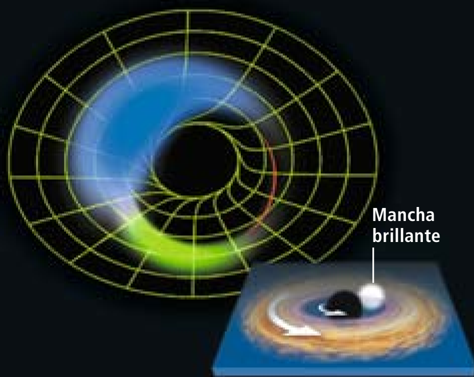
55 microsegundos de arco

LO QUE PUEDE REVELAR LA SILUETA

Las simulaciones muestran cómo aparecería un disco de acreción en torno a Sgr A* según su orientación y la magnitud de su giro. El trío de imágenes de más a la derecha incluye la difuminación causada por el gas interestelar.

La red de coordenadas en verde reposa en el plano del disco de acreción y está centrada en el agujero negro. El anillo más interno de la red se halla en el horizonte de sucesos del agujero negro. La curvatura de los rayos de luz provocada por la gravedad del agujero, o "efecto de lente gravitacional", distorsiona la red y aumenta la silueta del agujero. Como el disco de acreción orbita alrededor del agujero a velocidades que se acercan a la velocidad de la luz, interviene la relatividad especial; por ese motivo, el lado que se mueve hacia nosotros (en este caso, en el lado izquierdo del horizonte de sucesos) es mucho más brillante que el lado que se aleja. En la imagen de abajo, el gran momento angular del agujero negro causa una flexión adicional de la luz, distorsionándose aún más nuestra visión del plano ecuatorial y produciéndose un cambio radical del aspecto del gas en acreción.

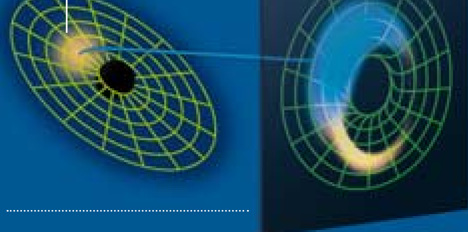
Por consiguiente, comparando las imágenes de Sgr A* con las simulaciones podremos descubrir la orientación del sistema y el giro del agujero negro, así como obtener, basándose en el tamaño de la silueta, una nueva medición de la masa del agujero.

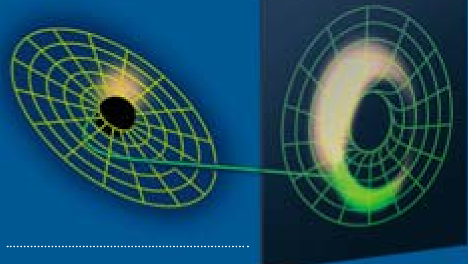


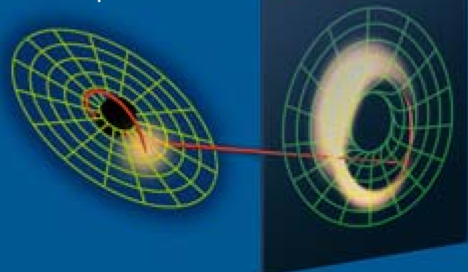
MEDIR LA GRAVEDAD CON IMAGENES DEL EFECTO LENTE

Se puede medir la gravedad muy cerca de un agujero negro mediante el análisis de las múltiples subimágenes (producidas por el efecto de lente gravitatoria) de una mancha brillante en un disco de acreción. Arriba se muestra una imagen simulada de una mancha brillante y cercana a un agujero negro, en giro moderado. Los colores indican sus tres subimágenes constituyentes; la explicación se encuentra en los diagramas inferiores.

La imagen principal (*región azul*) está formada por las ondas de radio que viajaron desde el punto hasta la Tierra a lo largo de la trayectoria más directa (*línea azul*). Gracias a la intensa gravedad del agujero, algunos de los rayos que la mancha había emitido anteriormente dan un rodeo alrededor del agujero (*línea verde*) y llegan a la Tierra al mismo tiempo, formándose así la imagen secundaria (*región verde*). Los rayos que se emitieron incluso antes y ejecutaron una órbita completa alrededor del agujero negro (*línea roja*) generan la apenas visible imagen terciaria (*región roja*). Las posiciones y formas de las subimágenes dependen de cómo la gravedad curve la luz en diversos lugares muy cercanos al agujero; el análisis de la imagen completa puede, pues, revelar si la relatividad general describe correctamente la gravedad.







TOM LOWE *Timescapes.org* (*CARMA*); GEORGE RETSECK (*globo*); CORTESIA DE AVERY E. BRODERICK (*simulación informática*); JEN CHRISTIANSEN (*ilustraciones*)

Karl Gebhardt, de la Universidad de Texas en Austin, y Jens Thomas, del Instituto Max Planck de Física Extraterrestre, en Garching, con los datos más recientes y los modelos más actualizados de la distribución de estrellas y de materia oscura de M87, le calcularon una masa de 6400 millones de soles; su silueta, entonces, tendría un diámetro de unas tres cuartas partes el de Sgr A*.

En muchos aspectos, M87 resulta más interesante y prometedor que Sgr A*. Presenta un vigoroso chorro, que se extiende a lo largo de 5000 años luz; resolver la región de lanzamiento del chorro proporcionaría información decisiva para los teóricos que persiguen entender esas emisiones ultrarrelativistas. A diferencia de Sgr A*, M87 se encuentra en el hemisferio norte; es, pues, más asequible a la VLBI con los observatorios existentes, ya que pocos de ellos están en el sur. Además, al tener el agujero negro de M87 dos mil veces el tamaño de Sgr A*, los cambios dinámicos se producirán en días, no en minutos. El período orbital cerca del borde interior del disco de acreción es de entre media semana y cinco (dependiendo de la rotación del agujero). La obtención de secuencias de imágenes de lo que fuese sucediendo resultaría mucho más fácil con M87. Por último, las imágenes de alta resolución estarían, probablemente, menos emborronadas por el gas interestelar que las de Sgr A*. Hasta la fecha, las mejores imágenes VLBI de M87, tomadas en longitudes de onda de dos a siete milímetros, alcanzan una resolución de alrededor de 100 microsegundos de arco, más del doble del tamaño de la silueta esperada.

A la larga, y es una posibilidad apasionante, cabría tomar imágenes de los destellos que se ven de vez en cuando en las emisiones de Sgr A* y de M87. Si algunos de esos destellos son causados por manchas brillantes en el flujo de acreción, como la mayoría de los teóricos espera, valdrían para cartografiar con mayor detalle el espaciotiempo en torno al horizonte. La imagen principal de cada mancha estaría acompañada de imágenes adicionales, correspondientes a los rayos de luz que llegarían al observador tras rodear el agujero por caminos sinuosos (*véase el recuadro* "Imágenes del horizonte"). Las formas y las posiciones de tales imágenes de orden superior codificarían la estructura del espaciotiempo cerca del agujero negro; la medirían de forma independiente en los diferentes lugares atravesados por el haz de rayos de luz de cada imagen. En conjunto, esos datos pondrían a prueba rigurosamente las predicciones de la relatividad general concernientes a la intensa gravedad imperante cerca de los agujeros negros.

Bibliografía complementaria

EVENT-HORIZON-SCALE STRUCTURE IN THE SUPERMASSIVE BLACK HOLE CANDIDATE AT THE GALACTIC CENTRE. Sheperd S. Doeleman et al. en *Nature*, vol. 455, págs. 78-80; 4 de septiembre, 2008.

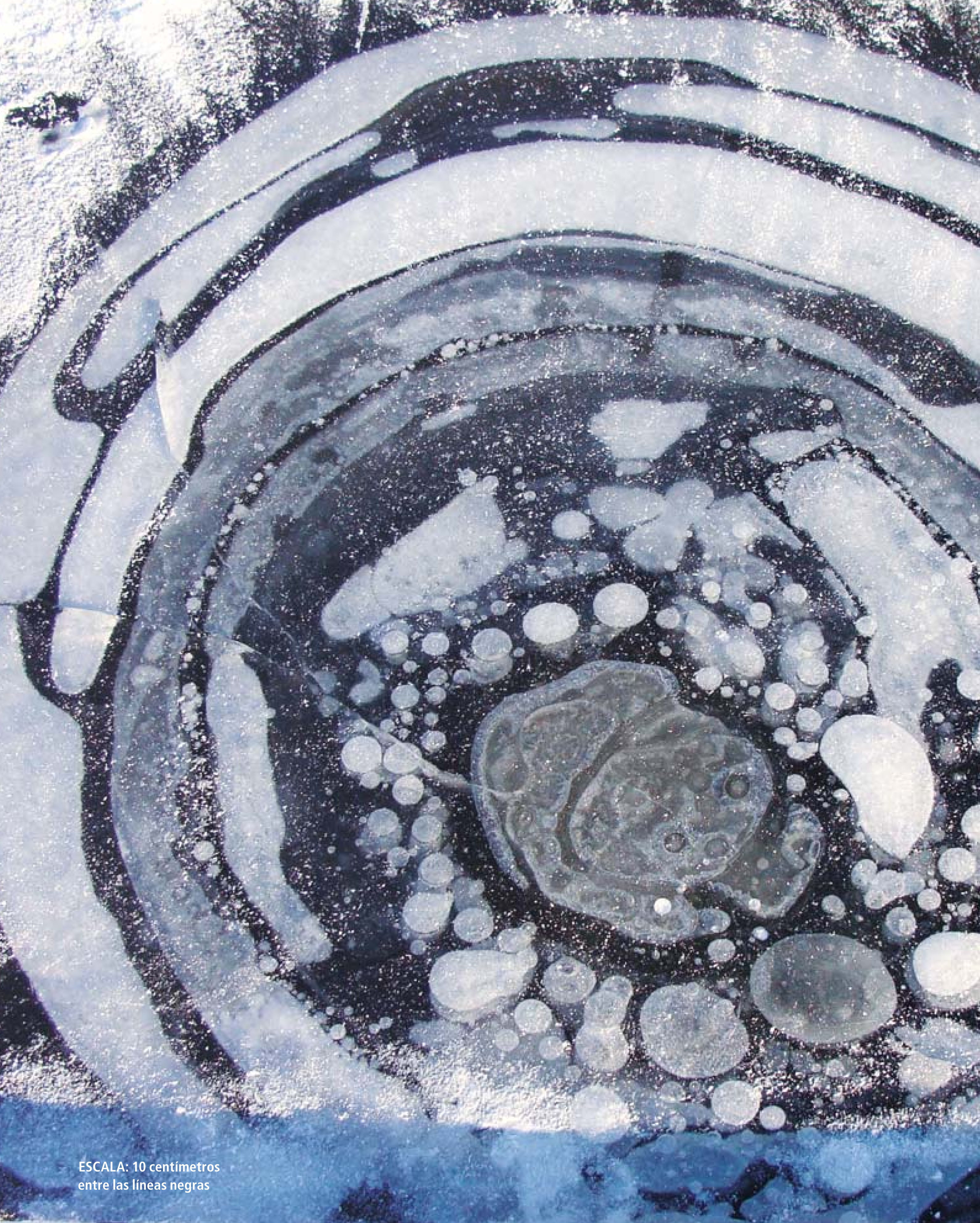
IMAGING THE BLACK HOLE SILHOUETTE OF M87: IMPLICATIONS FOR JET FORMATION AND BLACK HOLE SPIN. Avery E. Broderick y Abraham Loeb en *Astrophysical Journal*, vol. 697, págs. 1164-1179; 1 de junio, 2009.

THE EVENT HORIZON OF SAGITTARIUS A*. Avery E. Broderick, Abraham Loeb y Ramesh Narayan en *Astrophysical Journal*, vol. 701, págs. 1357-1366; 20 de agosto, 2009.

IMAGING AN EVENT HORIZON: SUBMM-VLBI OF A SUPER MASSIVE BLACK HOLE. Sheperd S. Doeleman et al. en *ASTRO2010 Decadal Review*. En la red en arxiv.org/abs/0906.3899.

INSIDE BLACK HOLES. Andrew J. S. Hamilton. Incluye animaciones del descenso a un agujero negro. En la red en jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh

Dirección electrónica de Grupo Galáctico de la Universidad de California en Los Angeles: www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc



ESCALA: 10 centímetros
entre las líneas negras

1. EL GAS METANO (*blanco*) emerge del fondo de un lago ártico y se congela en el hielo que se forma en la superficie del agua.

Metano: UNA AMENAZA EMERGENTE



A medida que se vaya derritiendo el permafrost del Artico, se irán formando lagos que emitirán metano. Este gas de efecto invernadero podría acelerar el calentamiento global

KATEY WALTER ANTHONY

Aterrizamos sobre la pista de grava de Cherskii, en el noreste siberiano. Era la última etapa de una expedición de cinco días que nos llevó de la Universidad de Alaska Fairbanks, a través de Rusia, a la Estación Científica del Noreste, en la tierra de millones de lagos. La visita —que no era la primera— formaba parte de un gran proyecto: realizar el seguimiento de un gigante inquieto que podría acelerar el calentamiento global.

Las expediciones de esa clase nos ayudan a comprender en qué medida se funde el suelo permanentemente congelado (permafrost) en Siberia y a lo largo del Artico, y la cantidad de metano que se generaría en el proceso. En nuestra opinión, y en la de numerosos científicos y políticos, se trata de un asunto de interés porque el metano es un gas de potente efecto invernadero: retiene 25 veces más calor que el dióxido de carbono. Si el permafrost se derrite con el calentamiento global, el planeta se calentaría con mayor prontitud que lo que predicen los modelos actuales. Nuestros datos, junto con los análisis realizados por otras investigaciones, revelan tendencias alarmantes.

Cruzar el umbral

Los cambios en el permafrost resultan preocupantes porque el suelo congelado, que ocupa el 20 por ciento de la superficie de la Tierra,

CONCEPTOS BASICOS

- El metano que penetra en la atmósfera procedente del deshielo del permafrost que subyace bajo numerosos lagos del Artico acelera el calentamiento global.
- Las nuevas estimaciones indican que, hacia 2100, el deshielo del permafrost aumentará entre un 20 y un 40 por ciento las emisiones globales (procedentes de todas las fuentes, naturales y humanas) de este potente gas de efecto invernadero.
- Lo único que podemos hacer para frenar el deshielo es limitar el calentamiento global mediante la reducción de nuestras emisiones de dióxido de carbono.

almacena, sólo en las decenas de metros más externas, cerca de 950.000 millones de toneladas de carbono. (El permafrost prosigue centenares de metros abajo.) El carbono retenido se halla en forma de restos de plantas y animales muertos y se ha acumulado en el transcurso de decenas de miles de años. Mientras permanezca congelado en los numerosos lagos, o bajo los mismos, estará apartado de forma segura de la atmósfera.

Pero, cuando el permafrost se descongela, el carbono atrapado queda a disposición de los microorganismos, que lo degradan con prontitud, produciendo gases. Lo mismo sucedería si nos dejáramos la puerta del congelador abierta: se descongelaría la comida y empezaría a pudrirse. El oxígeno estimula la descomposición aeróbica, por parte de bacterias y hongos, de la materia orgánica, con la producción consiguiente de dióxido de carbono.

Sin embargo, un suelo anegado, como los sedimentos de los fondos lacustres, es pobre en oxígeno. En esas condiciones se produce una descomposición anaeróbica, que libera metano, junto con cierta cantidad de dióxido de carbono. Bajo los lagos, las moléculas de gas metano forman burbujas que ascienden a través de la columna de agua, alcanzan la superficie, revientan y entran a la atmósfera.

La descomposición anaeróbica constituye la fuente principal de metano en el Artico. El hielo derretido del permafrost provoca la subsidencia de la superficie. El agua de escorrentía inunda pronto las depresiones resultantes; se crean así multitud de pequeños y nuevos lagos, que arrojan metano a la atmósfera conforme el permafrost que ahora ocupa su fondo se derrite. Las huellas revelan que ese proceso viene desarrollándose desde hace 10.000 años, cuando la Tierra entró en el período interglaciar cálido más reciente. Ahora, las imágenes de satélite registradas en los últimos decenios sugieren que el deshielo del permafrost podría estar acelerándose.

Los registros recabados coinciden con las observaciones obtenidas por las numerosas estaciones de monitorización que se han instalado en Alaska y Siberia, controladas por Vladimir E. Romanovsky, también de Fairbanks, y otros. Romanovsky señala que la temperatura del permafrost en los puntos de observación ha aumentado desde principios de los setenta. Basado en tales mediciones, calcula que de un tercio a la mitad del permafrost de Alaska se encuentra a entre 1 y 1,5 grados centígrados de la fusión. En algunos lugares del planeta, el permafrost cruza ya el umbral crítico de los cero grados.

Las observaciones actuales, realizadas por nuestro equipo de investigación durante las campañas de campo en Cherskii y otros puntos, sumados a los realizados por más expertos, respaldan la hipótesis de que el deshielo se acelera e indican que las emisiones podrían ser mucho mayores de lo que se había previsto. Las últimas estimaciones indican que, con las tasas de calentamiento actuales, hacia 2100 el deshielo del permafrost podría aumentar las emisiones de metano más allá de lo que lo harían el conjunto de las demás fuentes naturales o humanas. Según Vladimir Alexeev, otro colaborador de Fairbanks, este gas de efecto invernadero adicional, junto al dióxido de carbono extra que ese deshielo liberaría, aumentarían la temperatura media anual de la Tierra en 0,32 grados centígrados.

Aunque parezca un incremento menor, no lo es. Contribuiría de forma notable a las alteraciones que el calentamiento global induce sobre el clima, el nivel del mar, la agricultura y la propagación de enfermedades. Si se liberaran depósitos de metano más profundos —como los “hidratos de metano”— la temperatura se elevaría varios grados. Si queremos evitar que extensas regiones del Artico superen el umbral crítico, no nos queda más remedio que ralentizar de forma contundente la tasa de calentamiento.

AMENAZADOS POR LAS CIFRAS

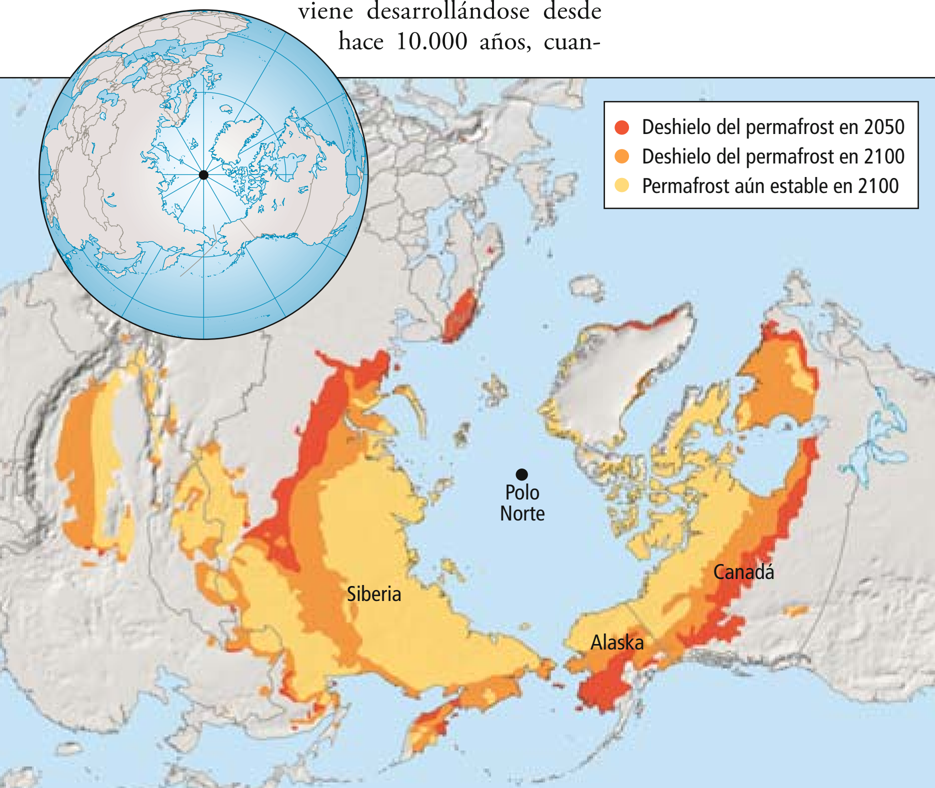
El permafrost cubre un 20 % de la superficie de las tierras emergidas del planeta.

De un tercio a la mitad del permafrost, una rica fuente de metano, se encuentra hoy a entre 1 y 1,5 ºC del deshielo.

Según las tasas de deshielo previstas, hacia 2100 el permafrost incrementará la liberación de metano en la atmósfera entre un 20 % y un 40 % más del que producirían todas las otras fuentes, naturales y humanas, juntas.

El metano atmosférico tiene un poder calorífico 25 veces mayor que el del dióxido de carbono.

Como resultado, la temperatura media anual del planeta podría incrementarse en 0,32 ºC adicionales, lo que alteraría el clima y el nivel del mar.



◀ 2. EXPUESTOS AL NORTE: Entre 2050 y 2100 se derretirán vastas extensiones de permafrost, si no se frena el calentamiento global; ello causará la liberación de grandes cantidades de metano, que intensificarán todavía más el calentamiento.

MAPPING SPECIALISTS

El criadero de Siberia

Las regiones de muestreo como la de Cherskii son fundamentales para verificar, o revisar,





▲ **3. A LA CABEZA DE UN GRAN PROYECTO para calcular la cantidad mundial de metano liberada a la atmósfera, la autora y el doctorando Dragos Vas capturan las burbujas de gas que escapan hacia el hielo que cubre un lago del interior de Alaska. Lo mismo que el gas natural, el metano es inflamable.**

CORTESIA DE MARMIAN GRIMES *Marketing y Comunicación de la Universidad de Alaska Fairbanks*

nuestras estimaciones. Mientras camino por la orilla de un río siberiano con Sergei A. Zimov, colaborador mío adscrito a la Estación Científica del Noreste, voy con mucho cuidado allí donde me paro. Aquí, la epidermis de la Tierra tiene tan sólo medio metro de grosor; consta en su mayor parte de turba fangosa y musgosa, que descansa inestable sobre un hielo de entre 40 y 80 metros de grosor. Los árboles raquíticos se inclinan hacia todos los ángulos en ese "bosque ebrio", porque no pueden arraigar ni en el suelo helado ni en los acentuados desniveles que provocan los ciclos veraniegos de deshielo. Detrás de mí, un árbol "borracho" se estrella contra el suelo; a través de la cubierta turbia del suelo boscoso observamos una brillante superficie negra de hielo y percibimos el olor a humedad de la materia orgánica en descomposición. Hallamos también, dispersos por doquier, huesos en número ilimitado: de rinoceronte lanudo, mamut, león del Pleistoceno, oso y caballo.

Para Zimov, esa región es una mina. Y no precisamente de colmillos y esqueletos de fauna extinta. En 1989, intrigado por la cuestión del carbono capturado en el suelo, levantó, junto con un grupo de jóvenes, la Estación Científica del Noreste, con el propósito de realizar un seguimiento a lo largo del año del permafrost de la taiga y la tundra. Los investigadores recorrieron los grandes ríos de Rusia en pequeños botes y escalaron sin cuerdas los riscos del permafrost para medir el contenido de carbono, precursor de la liberación de metano. Con tanques del ejército y *bulldozers* simularon perturbaciones que removían el suelo de un modo parecido a como lo hacen los incendios forestales más violentos. Sus experimentos demostraron la dimensión e importancia de la aportación de carbono del permafrost al total del planeta.

¿Por qué Zimov, y después nosotros, centramos aquí nuestras investigaciones, en un lugar conocido hasta entonces sólo por los gulags soviéticos? Porque no todo el permafrost es igual. Cualquier suelo cuya temperatura media anual sea inferior a 0 grados centígrados durante al menos dos años consecutivos se considera permafrost, exista o no presencia de hielo. Esa vasta región de Siberia contiene "yedoma", un tipo de permafrost rico en hielo y carbono, ambos de gran importancia en la cuestión del metano. Más del 90 por ciento del volumen de ese suelo lo constituyen bloques de hielo, algunos de 10 a 80 metros de altura y otros de menor tamaño. El 10 por ciento restante corresponde a columnas de suelo rico en materia orgánica, una acumulación de los restos de los mamíferos pleistocénicos y la hierba que comieron.

El yedoma se formó sobre unos 1,8 millones de kilómetros cuadrados de Siberia y algunos pequeños rincones de Norteamérica durante el final de la última Edad del Hielo. La materia orgánica se congeló in situ antes de que los microorganismos llegaran a descomponerla. Quedó confinada una ingente reserva de alimento hasta que un cambio en las condiciones dejara abierta la puerta del congelador.

El clima reciente, más cálido, ha favorecido la fusión del hielo del yedoma, que ha dado lugar a la formación de lagos. La vegetación cae en sus orillas con la descongelación del suelo y subside en un proceso de termocarst. En la actualidad, los lagos cubren un 30 por ciento de la superficie siberiana. La persistencia del deshielo los hace más extensos y profundos; el fenómeno provoca la coalescencia entre

La autora

Katey Walter Anthony es investigadora del Centro de Investigaciones Ambientales y del Agua de la Universidad de Alaska Fairbanks. Reparte su tiempo entre Alaska y el trabajo de campo en Siberia, donde estudia las emisiones de metano y dióxido de carbono procedentes de lagos y del deshielo del permafrost.

PRODUCCION DE METANO

En el Artico, la materia orgánica de animales y plantas muertos descansa en el antiguo permafrost que subyace bajo la delgada capa que forma el suelo moderno. Sin embargo, a medida que se calienta la atmósfera, se va derritiendo el suelo. Comienza entonces la producción de metano.



1 El hielo del suelo congelado se derrite y el suelo subside, formando depresiones que se inundan de agua y se convierten en estanques.



2 Los estanquen se fusionan y crean lagos. El agua derrite el suelo y los microorganismos llevan a cabo la descomposición anaeróbica de la materia orgánica, que produce metano.



3 El ahondamiento de los lagos derrite el permafrost, el subsuelo congelado rico en materia orgánica. Este se descompone al tiempo que genera multitud de burbujas de metano que ascienden hasta la superficie del lago y estallan en la atmósfera.

KEVIN HAND (*ilustración*)

ellos, lo que origina extensas masas de agua productoras de metano.

Transportado en una burbuja

En los noventa, los investigadores de la Estación Científica del Noreste observaron que, a lo largo del año, el metano emergía en burbujas desde el fondo de los lagos; sin embargo, desconocían la importancia que podían alcanzar los lagos a escala global. A ello se debió mi visita a Cherskii del pasado agosto, mi novena expedición para desentrañar la desmesurada expansión de los lagos termocársticos y calcular los cambios del permafrost y la liberación de metano.

Mis indagaciones empezaron mientras preparaba mi proyecto de tesis doctoral en el año 2000. En ese momento ya se sabía que estaban creciendo los niveles de metano, el tercero en abundancia de los gases de efecto invernadero en la atmósfera tras el dióxido de carbono y el vapor de agua. La cantidad y la tasa de incremento de las emisiones no tenía precedente en los últimos 650.000 años. Las pruebas indicaban que, en el pasado, la concentración de metano atmosférico habría fluctuado en un 50 por ciento de acuerdo con las variaciones naturales del clima a lo largo de miles de años. Sin embargo, esas variaciones se mostraban limitadas frente al incremento de casi el 160 por ciento dado desde mediados del siglo XVIII: de 700 partes por mil millones antes de la Revolución Industrial hasta casi 1800 partes por millardo cuando empecé mi proyecto.

Se sabía también que la agricultura, la industria, los vertidos y otras actividades humanas estaban implicados en el crecimiento más reciente del metano, por mucho que la mitad del gas que alcanzaba la atmósfera procedía de fuentes naturales. Sin embargo, nadie había determinado la dimensión de esas fuentes.

Entre 2001 y 2004 repartía el tiempo entre mi despacho en Fairbanks y el trabajo en Cherskii con Zimov y otros. Convivíamos con las familias rusas del lugar. En la biblioteca del ático, sobre nuestra diminuta estación de investigación amarilla de madera, pasé largas noches remendando boyas de plástico para emplearlas luego en los lagos en la captura de pompas de metano. Coloqué las trampas al lado de algunos botes abandonados; las controlaba a diario, para registrar el volumen de gas atrapado en sus faldas. Al principio capturaba poco metano.

El invierno llega pronto. Una mañana de octubre, cuando el hielo, negro, apenas si había adquirido grosor suficiente para soportar mi peso, sorteé hasta la superficie, reluciente. "¡Ajá!". Parecía que contemplara un cielo estrellado. Unos conjuntos esplendentes de burbujas blancas atrapadas en la fina capa de hielo negro se repartían por la superficie, indicándome el camino hacia las filtraciones, los puntos del lecho del lago por donde escapaban las burbujas. Clavé un punzón metálico en una gran burbuja blanca; salió disparado hacia arriba el gas de su interior. Acerqué una cerilla y se formó una llama de 5 metros de altura que me empujó hacia atrás, me abrasó la cara y me chamuscó las cejas. ¡Metano!

Durante todo el invierno, me aventuré a cruzar los lagos congelados para colocar más trampas sobre las filtraciones observadas. En más de una ocasión pisé, sin saberlo, focos de ebullición y los sumergí en el agua helada. Los focos de metano en los lechos de los lagos pueden emitir tanto gas, que la convección

provocada por el burbujeo dificulta la congelación, de modo que se forma sólo una fina capa de hielo sobre ellos. El proceso deja oquedades quebradizas del tamaño de una tapa de alcantarilla, aun cuando la temperatura alcanza los 50 grados centígrados bajo cero del oscuro invierno siberiano. Recogí hasta 25 litros diarios de metano de cada una de las filtraciones, muy por encima de lo que suele encontrarse. Elaboré mapas de los puntos de filtración y calculé sus emisiones en numerosos lagos. La liberación de metano máxima se daba cerca de los márgenes de los lagos, allí donde la fusión del permafrost es mayor. En algunos lugares, la datación por radiocarbono del gas indicó una edad superior a 43.000 años, atribuible al carbono del yedoma.

De 2002 a 2009 llevamos a cabo la medición de las filtraciones de metano en 60 lagos de distintos tipos y extensión en Siberia y Alaska. No esperábamos, en absoluto, que el incremento de las emisiones de metano en la zona de los lagos no fuera proporcional al incremento global en toda la región. Era un 45 por ciento mayor. Se estaba acelerando.

Si se extrapolaban nuestros resultados a los lagos de todo el Artico, las estimaciones preliminares indicaban que se liberaban de 14 a 35 millones de toneladas de metano al año. Los datos obtenidos de los registros realizados en testigos de hielo polar y la datación por radiocarbono de antiguas cuencas lacustres han revelado que hace entre 10.000 y 11.000 años los lagos termokársticos contribuyeron de forma notable al repentino calentamiento climático, con hasta el 87 por ciento del metano del hemisferio norte que favoreció el final de la Edad del Hielo. De semejante flujo se infiere que, bajo ciertas condiciones, se aceleran el deshielo del permafrost y la emisión de metano, de modo que se produce un ciclo de retroalimentación positiva: el carbono del Pleistoceno se libera en forma de metano, que contribuye al calentamiento atmosférico, que desencadena a su vez más deshielo y, por tanto, más emisiones de metano. En la actualidad, el calentamiento antropogénico amenaza con desencadenar de nuevo un ciclo semejante.

¿A qué velocidad se produce tal retroalimentación? En 2007, los modelos sobre el clima global aportados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) predecían el mayor calentamiento futuro en las latitudes elevadas, en algunos casos con un incremento de entre siete y ocho grados centígrados al final del siglo XXI. Según nuestras previsiones, deducidas a partir de numerosos análisis, se emitirán al menos 50.000 millones de toneladas de metano de los lagos termokársticos de Siberia conforme se funda el yedoma a lo largo de los próximos decenios o siglos. Una cifra que decuplica la cantidad actual de metano atmosférico.

Ajustar los modelos

Aun esforzándonos al máximo, nuestras estimaciones actuales requieren modelos más refinados y la consideración de potenciales



▲ 4. LOS LAGOS se forman en Siberia a medida que el aire cálido va derritiendo el fondo congelado (*arriba*). Abajo, la autora (*rojo*) y la doctoranda Louise Farquharson toman muestras del afloramiento de permafrost (*tierra gris*), que a menudo se extiende decenas de metros bajo una delgada capa de suelo no congelado.

CORTESIA DE GUIDO GROSSE INSTITUTO DE GEOFISICA, UNIVERSIDAD DE ALASKA FAIRBANKS

HIDRATOS DE METANO

El permafrost no es el único punto de interés por lo que al metano se refiere. Grandes cantidades de ese gas se encuentran atrapadas en celdas de hielo a centenares de metros de profundidad, bajo la tierra y bajo el fondo del mar. Si esos "hidratos de metano" se fundieran y liberaran a la atmósfera su gas, muy probablemente desencadenarían un repentino cambio climático. Los datos obtenidos de los sedimentos del fondo marino sugieren que un evento de ese tipo, alimentado por una subida brusca de la temperatura del océano, podría haber ocurrido hace unos 55 millones de años.

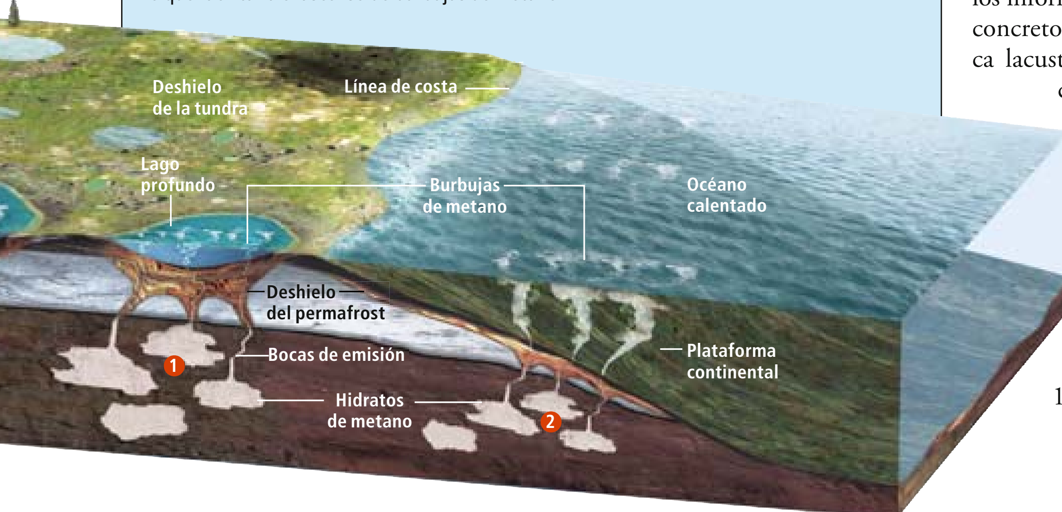
Algunos científicos rusos advierten de la acumulación de más de 1 billón de toneladas de metano bajo la plataforma continental siberiana, la tierra sumergida que se extiende desde la línea de costa hacia el mar hasta su borde, donde enlaza abruptamente con el océano más profundo. Aunque se escapara sólo el 10 por ciento del gas (100.000 millones de toneladas), ya duplicaría los 50.000 millones de toneladas que estimamos liberaría el deshielo del permafrost. El calentamiento del océano profundo es improbable en un futuro próximo. Sin embargo, se han observado en fecha reciente concentraciones de metano elevadas en aguas someras a lo largo de la plataforma. Las investigaciones permitirán determinar si su origen son los hidratos o, con mayor probabilidad, la descomposición de la materia orgánica en el permafrost que se deshiela en el fondo del mar.

En tierra, si el deshielo del lecho del lago se extiende y ramifica hacia profundidades mayores, bajo el fondo marino, podría ser que el proceso irrumpiera en los depósitos de hidratos; ello proporcionaría a las burbujas un canal de ascenso, por donde atravesarían el agua y alcanzarían la atmósfera. En colaboración con Carolyn Ruppel y John Pohlman, del Servicio de Inspección Geológica estadounidense, estamos evaluando esa posibilidad.

Si se confirma que los hidratos constituyen una amenaza, el efecto podría contrarrestarse en cierta medida mediante la extracción de metano para su uso combustible, antes de que escapara a la atmósfera. El metano existente en el conjunto global de los hidratos produciría más energía que todos los depósitos del planeta de gas natural, petróleo y carbón sumados. Sin embargo, la extracción sería económicamente viable sólo para una fracción reducida, pues los depósitos se encuentran demasiado dispersos en estratos distintos, lo que encarece hasta el desistimiento su exploración y explotación, incluso aunque el barril alcanzara los 100 dólares. En algunos lugares, la concentración de hidratos podría resultar más rentable. Japón, Corea del Sur y China, ansiosos por reducir las importaciones de combustibles fósiles, invierten en técnicas que les permita aprovechar los depósitos. ConocoPhillips y British Petroleum están evaluando la viabilidad comercial de algunos depósitos de hidratos en los Estados Unidos.

La explotación de los hidratos resulta controvertida. Si existieran datos que apuntaran a una liberación inminente y descontrolada de metano procedente de hidratos desestabilizados, la extracción del gas mitigaría el calentamiento del clima. Por el momento, sin embargo, no existen pruebas de emisiones masivas de hidratos, por lo que su explotación comercial sólo agravaría los cambios climáticos inducidos por la combustión de combustibles fósiles. Desde el punto de vista del calentamiento global, será mejor dejar esos hidratos en las profundidades del subsuelo.

EL GIGANTE DE LAS PROFUNDIDADES ▼
Grandes y profundos depósitos de hielo y gas (hidratos) liberarían de forma repentina enormes cantidades de metano si se abriese una brecha. En teoría, habría dos caminos para esas emisiones. ❶ En las tierras emergidas, el deshielo del permafrost se ramificaría, se extendería hacia mayores profundidades e irrumpiría en un depósito, lo que permitiría el ascenso y escape del metano. ❷ Bajo las plataformas continentales, el calentamiento del agua del océano descongelaría la fina capa de permafrost y fundiría el hidrato helado, lo que facilitaría el ascenso de burbujas de metano.



procesos de realimentación negativa, que frenarían el ciclo. En Alaska, se están secando un número récord de lagos termokársticos. Los lagos formados en llanuras elevadas crecen hasta que se encuentran con una vertiente. Entonces, el agua fluye hacia abajo, provocando erosión y más drenaje; la mezcla de sedimentos es transportada hasta los ríos y, en algunos casos, hasta el océano. Las cuencas vacías de agua se pueblan de vegetación, convirtiéndose a menudo en zonas pantanosas. Aunque durante el deshielo de verano liberan metano, sus emisiones anuales no suelen superar las de los lagos.

Resulta difícil afirmar si esos procesos potenciales disminuirían la liberación de metano en cantidad considerable o sólo en un porcentaje reducido. En 2008 acometimos con Guido Grosse, compañero de Fairbanks, Lawrence Plug, de la Universidad Dalhousie de Nueva Escocia, Mary Edwards, de la Universidad de Southampton, y otros colaboradores, dos proyectos con el propósito de mejorar las primeras aproximaciones a las retroalimentaciones positivas y negativas.

De entrada, importa elaborar una cartografía y clasificar los lagos termokársticos y el ciclo del carbono en distintas regiones de Siberia y Alaska. Esperamos contar pronto con un borrador. La investigación interdisciplinar combina aspectos ecológicos con mediciones de emisiones, geofísica, teledetección, incubación, en el laboratorio, de suelos descongelados de permafrost y sedimentos lacustres, y otras disciplinas. Se trata de pergeñar un modelo cuantitativo de las emisiones de metano y dióxido de carbono procedentes de los lagos termokársticos desde el Ultimo Máximo Glacial (hace 21.000 años) hasta nuestros días, para predecir las retroalimentaciones del metano de los lagos en el calentamiento climático para los próximos decenios y siglos.

Para ayudar a predecir el efecto del calentamiento futuro sobre los lagos termokársticos, Plug y Mark Kessler, alumno posdoctoral de nuestro grupo, están desarrollando dos modelos informáticos. El primero, basado en un lago concreto, simulará la dinámica de una cuenca lacustre. El segundo modelo, paisajístico, contempla la dinámica de vertientes, los movimientos de las aguas superficiales y los cambios a escala paisajística del permafrost.

Los modelos se someterán a validación, primero a partir de la comparación con paisajes que ya estamos estudiando; se contrastarán luego con los datos obtenidos a partir de testigos de sedimentos de 15.000 años de antigüedad de Siberia

y Alaska; por fin, se confrontarán con simulaciones climáticas de hace 21.000 años. El paso final consistirá en asociar los modelos de lagos termokársticos con el modelo climático global del Centro Hadley ("Hadley Center Coupled Model"), que describe conjuntamente la circulación de la atmósfera y los océanos (uno de los principales modelos utilizados en los informes de evaluación del IPCC).

El resultado, esperamos, será un programa que podrá predecir la extensión y los efectos del deshielo del permafrost, lo que permitirá calcular la tasa futura de emisiones de metano y evaluar su efecto sobre las temperaturas globales.

Por supuesto, los futuros trabajos de campo continuarán depurando los datos introducidos en el modelo. Con la ayuda de un aerodeslizador, estudiaremos, en este curso, lagos a lo largo de casi 1600 kilómetros de ríos siberianos y de la costa ártica. Una gran expedición realizará sondeos en los lagos con el propósito de datar sus miles de años de antigüedad. La información obtenida en el campo, junto con las imágenes de satélite, se utilizará en el programa del Centro Hadley para determinar los factores dominantes del cambio climático desde el Ultimo Máximo Glacial hasta los próximos 200 años. Los mapas sobre el deshielo del permafrost y las emisiones de metano deberían estar listos en abril de 2011.

Soluciones

Si, como sugieren todos los indicadores, se aceleran las emisiones de metano procedente del permafrost ártico, se nos plantea una pregunta crucial: ¿Cómo podría prevenirse la liberación del metano? Una opción sería extraer el gas para aprovecharlo como combustible "limpio" antes de que escapara hacia la atmósfera. Sin embargo, la extracción del metano que emerge de una red de millones de lagos distribuidos de forma dispersa en regiones extensas resulta económicamente inviable; las filtraciones son demasiado difusas. Las comunidades cercanas a las fuentes de metano más potentes sí podrían utilizar ese gas como fuente de energía.

Zimov y su hijo, Nikita, han ideado un misterioso plan para mantener congelado el permafrost siberiano. Están creando un ecosistema de pastizales mantenido por grandes herbívoros de características similares a los que medraban en Siberia hace más de 10.000 años. Han introducido caballos, alces, osos y lobos en el "Parque del Pleistoceno", una reserva científica de 160 kilómetros cuadrados en la Siberia nororiental. Se proponen recuperar el buey almizcle y el visón, siempre en función de los fondos disponibles, procedentes de aportaciones privadas, el gobierno ruso y organismos de la administración estadounidense.

En el pasado, esos animales mantenían, junto con los mamuts, un ecosistema de pradera esteparia. El reluciente bioma de la pradera es más eficiente reflejando la radiación solar que el oscuro bosque boreal que lo ha sustituido, lo que ayuda a mantener congelado el permafrost subyacente. Más aún, en invierno, los herbívoros aplastan y excavan la nieve rebuscando alimento, lo que permite al frío polar enfriar con mayor celeridad el permafrost.

Un hombre y su familia han llevado a cabo un esfuerzo colosal para salvar al mundo del cambio climático mediante la creación del "Parque del Pleistoceno". Pero se hace necesaria una respuesta global, en la que cada persona, organización y estado se responsabilice de la disminución de su huella de carbono. La reducción de emisiones de dióxido de carbono es la única salida para evitar el refuerzo del círculo vicioso de un calentamiento mayor que provoca más deshielo del permafrost, que, a su vez, causa un mayor calentamiento.

Según nuestras predicciones, si las emisiones de carbono se incrementan al ritmo actualmente estimado, los lagos boreales liberarán de 100 a 200 millones de toneladas de metano al año hacia el 2100, mucho más de los entre 14 y 35 millones de toneladas que emiten ahora. El total mundial de emisiones corresponde a unos 550 millones de toneladas anuales; por tanto, el deshielo del permafrost añadirá, si no encuentra obstáculos, de un 20 a un 40 por ciento más, lo que provocará que los 0,32 grados centígrados adicionales en la temperatura media anual de la Tierra se noten antes.

Estamos en condiciones de agravar el cambio climático. Para reducir el dióxido de carbono atmosférico y con ello ralentizar el deshielo del permafrost debemos, todos juntos, afrontar la gran cuestión: el consumo humano de combustibles fósiles.

CIENCIA CIUDADANA: CENTINELAS DEL METANO

¿Vive cerca de un lago? ¿Cuánto metano emite? El metano emerge de cualquier fondo lacustre en el que se produzca descomposición de materia orgánica, no importa la latitud. Las represas que crean los castores, por ejemplo, son muy productivas. Para saber cómo contribuir en la cartografía de las emisiones de metano, visite la web de la Red de Monitorización del Metano de los lagos Pan-árticos (www.alaska.edu/uaf/cem/ine/walter/ongoing_projects.xml). Los educadores pueden implicarse a través del programa educativo que ofrece la web.



▲ 5. ¿SOLUCION? Un pastor de renos fija una cerca que rodea el Parque del Pleistoceno, una extensa zona de Siberia. Allí han introducido caballos de Yakutia y otros herbívoros para estabilizar las praderas que ayudarán a mantener congelado el permafrost.

CORTESIA DE SERGEI A. ZIMOV *Estación Científica del Noreste*

Bibliografía complementaria

METHANE BUBBLING FROM SIBERIAN THAW LAKES AS A POSITIVE FEED-BACK TO CLIMATE WARMING. K. M. Walter et al. en *Nature*, vol. 443, págs. 71-75; 7 de septiembre, 2006.

THERMOKARST LAKES AS A SOURCE OF ATMOSPHERIC CH_4 DURING THE LAST DEGLACIATION. K. M. Walter et al. en *Science*, vol. 318, págs 633-636; 26 de octubre, 2007.

ASSESSING THE SPATIAL AND TEMPORAL DYNAMICS OF THERMOKARST, METHANE EMISSIONS, AND RELATED CARBON CYCLING IN SIBERIA AND ALASKA. G. Grosse, K. Walter y V. E. Romanovsky. NASA Carbon Cycle Sciences Project, abril 2008-marzo 2011.

UNDERSTANDING THE IMPACTS OF ICY PERMAFROST DEGRADATION AND THERMOKARST-LAKE DYNAMICS IN THE ARCTIC ON CARBON CYCLING, CO_2 AND CH_4 EMISSIONS, AND FEEDBACKS TO CLIMATE CHANGE. K. Walter, G. Grosse, M. Edwards, L. Plug y L. Slater. Project 0732735 for National Science Foundation/ Año Internacional Polar, julio 2008-junio 2011.

GEOQUIMICA de los humeros blancos

El estudio de un nuevo tipo de fumarolas hidrotermales halladas en el fondo oceánico arroja luz sobre el origen de la vida

Alexander S. Bradley

En los continentes quedan escasos rincones por explorar y seguramente pocas maravillas naturales por descubrir. En el mundo submarino, en cambio, la historia es otra. Sabemos más sobre la superficie de Marte que sobre la superficie del lecho oceánico, que abarca un 75 por ciento del planeta. Un sinfín de sorpresas nos aguardan allí.

Se nos dio una en anticipo en diciembre de 2000. La expedición que estaba cartografiando el macizo Atlantis, una montaña submarina a mitad de camino entre las islas Bermudas y las Canarias, y a casi un kilómetro bajo la superficie del Atlántico Norte, descubrió una columna de roca blanca y tan alta como un edificio de 20 pisos que emergía del fondo del mar. Mediante el Argoll, un vehículo dirigido por control remoto, y el sumergible tripulado *Alvin*, los científicos exploraron y extrajeron muestras de tan misteriosa estructura. Aunque las limitaciones impuestas por la falta de tiempo redujeron las investigaciones a una sola inmersión del *Alvin*, se recogió información suficiente para determinar que aquella columna blanca constituía una más entre las múltiples estructuras de ese tipo que estaban emitiendo agua de mar caliente en dicha zona. Habían descubierto un campo de manantiales termales submarinos al que denominaron Campo Hidrotermal de la Ciudad Perdida. Nunca se había visto nada igual, incluidas las ahora célebres fumarolas negras (*black smokers*).

El primer artículo sobre el descubrimiento, publicado en *Nature* en julio de 2001, desató oleadas de entusiasmo en la comunidad científica. Un grupo de expertos encabezado por Deborah S. Kelley, de la Universidad de Washington, planteó una serie de preguntas fundamentales: ¿Cómo se formó ese campo hidrotermal? ¿Qué tipo de organismos vivían allí? ¿Cómo sobrevivían? Para descubrirlo, Kelly dirigió en 2003 una expedición ambiciosa, de seis semanas de duración, a la Ciudad Perdida. Tras años de minuciosos análisis de las muestras recogidas durante la misión, los investigadores están empezando a obtener respuestas fascinantes.

Los hallazgos obtenidos en la Ciudad Perdida han quitado el polvo a viejas teorías sobre las condiciones químicas que podrían haber sentado las bases para la aparición de vida sobre la Tierra. Los resultados han ampliado las hipótesis sobre los lugares donde podría existir vida, más allá del Planeta Azul, y han puesto en entredicho algunas de las ideas predominantes sobre cómo ir en su búsqueda.

Química extraña

La existencia de las fumarolas hidrotermales submarinas se conoce desde los años setenta del siglo XX. Las fumarolas negras son las más conocidas; se encuentran en las dorsales oceánicas, las cadenas de volcanes que recubren los lugares en donde las placas tectónicas se están separando entre sí. En esas fumarolas, el agua alcanza temperaturas superiores a los 400 grados Celsius, debido a su proximidad con la roca fundida. Con un *p*H parecido al del zumo de limón, el agua abrasadora disuelve sulfuros, hierro, azufre y zinc conforme se va filtrando entre las rocas que subyacen bajo el

CONCEPTOS BASICOS

- En 2000 se descubrió un nuevo tipo de sistema de fumarolas hidrotermales submarinas. Se le denominó Ciudad Perdida.
- En los últimos años, el análisis de muestras recogidas allí ha permitido conocer sus singulares características químicas y los microorganismos que sacan provecho de ellas.
- Los hallazgos sugieren que la vida podría haberse originado en un entorno similar al predominante en la Ciudad Perdida.

CORTESIA DE DEBORAH S. KELLEY *Universidad de Washington*, IFE, URI-IAO, NOAA



EL ECOSISTEMA de fumarolas hidrotermales de la Ciudad Perdida, que se diría estéril, abunda en microorganismos, muchos de los cuales medran independientemente de la energía procedente de la luz solar.

lecho oceánico. Posteriormente, a medida que ese fluido ácido y caliente retorna a la superficie del fondo marino, es emitido a través de las fumarolas; al entrar en contacto con el agua de mar fría, los sulfuros metálicos disueltos se enfrían rápidamente y precipitan, dando lugar a una mezcla turbia que presenta el aspecto de una nube de humo negro. La acumulación de los sulfuros metálicos en la parte superior de las fumarolas forma unas chimeneas que van haciéndose cada vez más altas.

A pesar del entorno químico hostil, las regiones que rodean a las fumarolas negras están repletas de animales exóticos. Entre éstos, gusanos del género *Rifita*, tubícolas gigantes que poseen una pluma de color rojo en la punta, carecen de boca e intestino y medran gracias a una asociación simbiótica con bacterias internas que consumen el venenoso sulfuro de hidrógeno (gas) que emana de las fumarolas.

En comparación con el entorno agreste de las fumarolas negras, las de la Ciudad Perdida son desconcertantemente tranquilas. A unos 15 kilómetros hacia el oeste de la frontera entre las placas tectónicas de la dorsal Mesoatlántica, el campo de fumarolas que se

encuentra sobre el macizo Atlantis se halla demasiado lejos como para que el magma ascendente pueda calentar los fluidos hasta alcanzar las abrasadoras temperaturas que se producen en las fumarolas negras. Acontece, por el contrario, que el agua se calienta gracias a las corrientes de convección que se originan a partir de las rocas calientes del fondo; las temperaturas máximas registradas alcanzan sólo los 90 grados Celsius. Los fluidos de la Ciudad Perdida tampoco son ácidos. Alcalinos, con un *p*H que oscila entre 9 y 11, parecido al del hidróxido de magnesio (leche de magnesia) o al de una disolución de amoniaco doméstico. Puesto que esas aguas no disuelven fácilmente concentraciones elevadas de metales como el hierro o el zinc, la Ciudad Perdida no produce las nubes de sulfuros metálicos que caracterizan a las fumarolas negras.

Antes bien, las aguas de los humeros de la Ciudad Perdida son ricas en calcio, que, al mezclarse con el agua marina, produce carbonato cálcico (caliza). Esta caliza forma chimeneas blancas gigantes, la mayor de las cuales se alza casi 60 metros sobre el fondo marino (más alta que la fumarola negra más esplendorosa).

La extraña química que se desarrolla en la Ciudad Perdida se debe a su incomparable marco geológico, enraizado en la estructura del propio planeta. Imaginemos que la Tierra es un melocotón, donde la piel representa la corteza, la carne equivale a la sólida capa de manto subyacente y el hueso corresponde al núcleo de hierro incandescente. En la dorsal Mesoatlántica, la corteza se está separando lentamente a medida que Norteamérica y Africa se alejan entre sí, a razón de unos 25 milímetros por año. La separación de la corteza ha dejado expuestas regiones del manto terrestre en el fondo oceánico; el afloramiento de este manto expuesto ha formado el macizo Atlantis.

El manto consta sobre todo de peridotita, un tipo de roca que resulta clave para explicar la química de la Ciudad Perdida. Cuando la peridotita entra en contacto con el agua, experimenta una reacción de serpentinización. A medida que el agua de mar se va filtrando en las profundidades del macizo, la peridotita se convierte en serpentinita y, como resultado de esa reacción, las aguas percolantes se tornan más alcalinas. Para cuando los fluidos vuelven y se mezclan con las aguas del océano, están saturados del calcio liberado durante la serpentinización. Y lo que reviste mayor interés: en ese momento los fluidos se encuentran muy reducidos (en el sentido químico), es decir, que el agua ha sido despojada de todo su oxígeno para ser sustituido por gases de alto contenido energético, como el hidrógeno, el metano y el sulfuro. En concreto, la concentración de hidrógeno es de las más elevadas que se han hallado nunca en un entorno natural. Y aquí es donde la historia empieza a adquirir interés.

LA CUNA DE LA VIDA

Las fumarolas de la Ciudad Perdida se hallan en lo alto del macizo Atlantis, una montaña submarina a 15 kilómetros al oeste del borde de placa tectónica de la dorsal Mesoatlántica. El estudio de las fumarolas ha puesto de manifiesto el proceso de formación de sus chimeneas. Los resultados sugieren que las condiciones químicas allí presentes podrían haber dado lugar a las primeras formas de vida sobre la Tierra.

El macizo consta, sobre todo, de peridotita. A medida que el agua de mar se va filtrando a través de las grietas del macizo, reacciona con la peridotita, transformándola en serpentinita. Tal serpentinización provoca varios procesos de suma importancia para la química de la Ciudad Perdida. Por un lado, hace que el agua caliente percolante adquiera un *p*H alcalino, que favorece la disolución del calcio. Conforme el agua emerge de las fumarolas y se mezcla con el agua de mar, se crea carbonato cálcico, que precipita en la parte superior de las fumarolas, erigiendo las chimeneas blancas. Además, la reacción hace que los fluidos de las fumarolas se saturen de gases de alto contenido energético, entre ellos el hidrógeno, que permite la proliferación de metanógenos en la parte superior y en el interior de las paredes de las chimeneas, independientemente de la energía procedente del Sol. Por último, la serpentinización da lugar a condiciones químicas que posibilitan la síntesis de compuestos orgánicos a partir de sustancias inorgánicas, un prerrequisito para la aparición de la vida.



En el principio

El hidrógeno está dotado de energía en razón de su capacidad para transferir electrones a otros compuestos, como el oxígeno; libera energía en el proceso. De los compuestos que ceden fácilmente electrones a otros se dice que son "reducidos". Durante largo tiempo, los científicos han sospechado que los gases reducidos desempeñaron una función clave en el origen de la vida sobre la Tierra.

En los años veinte del siglo pasado, Alexander Oparin y J. B. S. Haldane sugirieron, por separado, que la atmósfera terrestre primitiva debió haber sido muy rica en gases reducidos, como el metano, amoniaco e hidrógeno. Propusieron que, si la concentración atmosférica de esos gases hubiese sido elevada, los ingredientes químicos necesarios para la vida podrían haberse formado de manera espontánea.

La idea ganó en credibilidad varios decenios más tarde, con el experimento realizado en 1953 por Stanley Miller y Harold Urey, de la Universidad de Chicago. Al calentar y someter a descargas eléctricas una mezcla de gases reducidos, Miller y Urey obtuvieron di-

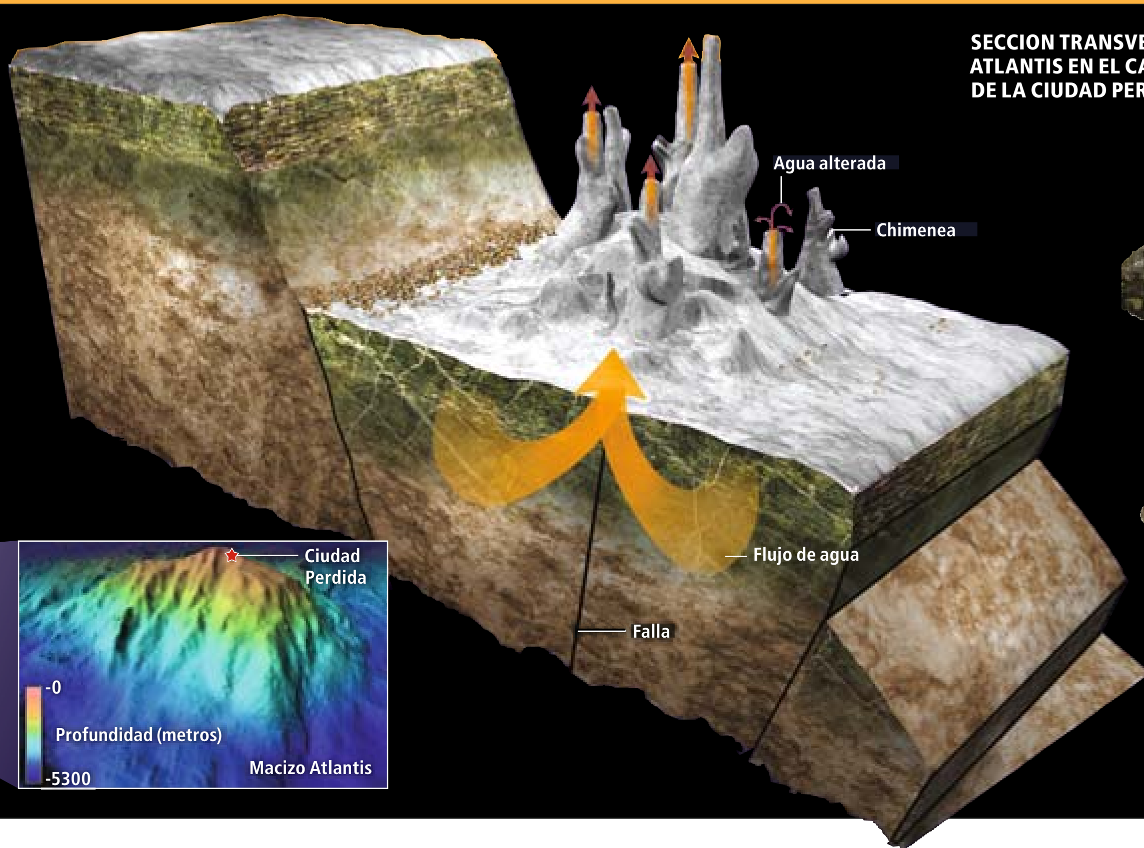
LA CIUDAD PERDIDA...

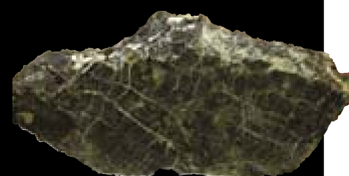
La Ciudad Perdida y las fumarolas negras constituyen manantiales termales submarinos. Sin embargo, difieren en varios aspectos. Indiquemos algunos de los atributos que caracterizan a la Ciudad Perdida.

- Se halla a 15 kilómetros al oeste de los volcanes de la dorsal Mesoatlántica
- La temperatura del agua alcanza los 90 grados Celsius
- El *p*H es muy alcalino
- El carbonato cálcico crea chimeneas blancas
- Algunas formas de vida funcionan independientemente de la energía procedente del Sol



DON FOLEY (*mapa y detalle*); FUENTE DEL MAPA: UNIVERSIDAD DE WASHINGTON; CORTESIA DE LA UNIVERSIDAD DE WASHINGTON, IFE, URI-IAO, LOST CITY SCIENCE PARTY AND NOAA (*fumarola*)





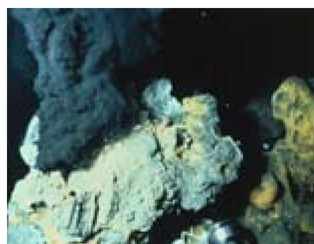


ILUSTRACION CORTESIA DE D. S. KELLEY Y CENTER FOR ENVIRONMENTAL VISUALIZATION, UNIVERSIDAD DE WASHINGTON; CORTESIA DE G. FRUH-GREEN *NOAA* (*serpentinita*); MICHAEL SZOENYI *Photo Researchers, Inc.* (*peridotita*); B. J. MURTON *Southampton Oceanography Center/Photo Researchers, Inc.* (*fumarola*)

...FRENTE A LAS FUMAROLAS NEGRAS

La proximidad de los humeros negros con el magma ascendente contribuye en gran parte a las características que los distingue de las fumarolas de la Ciudad Perdida.

- Se hallan en los volcanes de la dorsal Mesoatlántica
- La temperatura del agua alcanza los 400 grados Celsius
- El *p*H es muy ácido
- Los minerales que contienen sulfuros producen nubes de humo negro y crean las chimeneas
- Las formas de vida dependen indirectamente de la energía procedente del Sol



versos compuestos orgánicos (la mayoría de los compuestos que contienen carbono e hidrógeno); había, entre ellos, aminoácidos, los materiales de construcción para las proteínas que utilizan todos los seres vivos.

Sin embargo, durante los años posteriores al célebre experimento, los geólogos llegaron a la conclusión de que la atmósfera primitiva no estaba tan reducida como se había supuesto. Las condiciones que permitieron la formación de aminoácidos y otros compuestos orgánicos en el experimento de Miller-Urey probablemente nunca existieron en la atmósfera terrestre.

Pero en las fumarolas hidrotermales de la Ciudad Perdida sí abundan los gases reducidos. ¿Cabe la posibilidad de que, hace miles de millones de años, fumarolas similares hubiesen reunido las condiciones apropiadas para producir el tipo de compuestos orgánicos necesarios para la vida? Algunos geoquímicos que investigan la cuestión así lo creen. Varios estudios realizados durante el último decenio han sugerido que las reacciones químicas desarrolladas durante la serpentinización son idóneas para la producción de compuestos orgánicos a partir de dióxido de carbono.

Ciertos sistemas hidrotermales similares a los de la Ciudad Perdida pudieron haber operado a modo de fábricas primitivas que produjeron enormes cantidades de metano, ácidos orgánicos sencillos y quizás incluso ácidos grasos más complejos, que son componentes esenciales de las membranas celulares de todos los organismos. Y las fumarolas podrían haber generado esos compuestos orgánicos sin la ayuda de organismos vivos.

La Ciudad Perdida constituye un laboratorio natural donde poder comprobar esas hipótesis. En 2008, Giora Proskurowski, del Instituto Oceanográfico Woods Hole, y sus colaboradores publicaron un artículo en *Science* en donde demostraban que los fluidos hidrotermales de la Ciudad Perdida contenían metano, etano y propano, compuestos orgánicos. Otras investigaciones sugieren que las reacciones que tienen lugar en la Ciudad Perdida producen también ácidos orgánicos de pequeño tamaño como formiato y acetato. En conjunto, esos hallazgos confirman que las condiciones reducidas de las fumarolas de la Ciudad Perdida podrían propiciar los tipos de reacciones químicas necesarios para crear compuestos orgánicos a partir de compuestos inorgánicos, una etapa crucial, aunque sencilla, en la química prebiótica.

Este nuevo trabajo arriba a la conclusión de que algunos entornos del tipo de los humeros hidrotermales poseen la capacidad de producir, al menos, compuestos orgánicos sencillos, posibles ingredientes para la vida. Pero la Ciu-

dad Perdida presenta un inconveniente para la comprobación de esa hipótesis: las torres de carbonato no son reactores químicos estériles, sino que se encuentran repletas de vida microbiana, lo que deja abierta la posibilidad de que estos microorganismos contribuyan a la formación de compuestos orgánicos en los fluidos de las fumarolas. La resolución del misterio exige un estudio más profundo de los microorganismos.

Sin necesidad del Sol

Abundan los microorganismos que han desarrollado la capacidad de consumir la abundante energía que contiene el hidrógeno. Pensemos en los metanógenos. Como su nombre indica, se trata de microorganismos que generan metano, el gas natural que muchos de nosotros utilizamos para calentar nuestro hogar y cocinar. Se da la circunstancia de que casi la tercera parte de los microorganismos de la Ciudad Perdida corresponde a metanógenos de la familia de los Methanosarcinales. Su presencia no mueve a la sorpresa, dada la abundancia de hidrógeno en los fluidos de los humeros hidrotermales. Lo que resulta fascinante es que los metanógenos de la Ciudad Perdida operen con independencia del Sol.

El autor

Alexander S. Bradley completó su tesis doctoral en geoquímica en el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 2008. Centró su tesis en el análisis de los compuestos orgánicos de los sistemas hidrotermales de la Ciudad Perdida y del Parque Nacional de Yellowstone. En la actualidad, trabaja en el Instituto Agouron de la Universidad de Harvard, empeñado en establecer conexiones entre la microbiología y la geoquímica.

Prácticamente toda la vida sobre la Tierra depende de la energía solar, ya sean humanos (que dependen de los organismos fotosintéticos para obtener alimento) o plantas y algas fotosintéticas. Incluso en los humeros negros, en las profundidades abisales más oscuras, la vida depende del Sol. Los microorganismos que propician el crecimiento de los gusanos tubícolas gigantes necesitan sulfuros y oxígeno, la fuente del cual son, en última instancia, los organismos fotosintéticos que medran mucho más arriba. Por el contrario, todo lo que requieren los metanógenos de la Ciudad Perdida para sobrevivir es dióxido de carbono, agua líquida y peridotita, que reacciona para producir las materias primas necesarias.

Se ha descubierto que las reacciones geoquímicas derivadas de la serpentinización, así como la actividad de los metanógenos biológicos, aportan metano al ecosistema de la Ciudad Perdida. Esta generación simultánea de metano quizá no sea una coincidencia. En una serie de estudios realizados durante los últimos años, William Martin, de la Universidad Heinrich-Heine, y Michael Russell, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA en Pasadena, estudiaron las etapas químicas que se precisan para la producción abiótica de metano, es decir, sin la presencia de seres vivos, en ambientes como los de la Ciudad Perdida. Descubrieron que cada etapa tiene una réplica en las rutas biológicas que utilizan los organismos para generar metano.

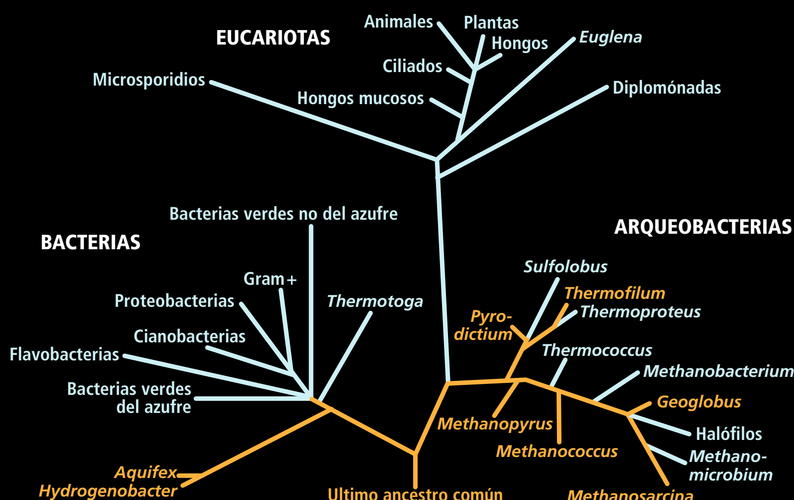
Basados en sus resultados, Martin y Russell propusieron que, en la Tierra primitiva, lugares como la Ciudad Perdida produjeron metano de forma geoquímica; las formas de vida primordiales sencillamente se habrían apropiado de cada una de las etapas químicas, dando lugar a lo que podría haber sido el origen de la primera ruta bioquímica.

Martin y Russell no han sido los primeros en sugerir que la vida podría haber surgido en una fumarola hidrotermal. Esa idea viene circulando desde hace años. Se apoya no sólo en las convenientes condiciones químicas de los sistemas hidrotermales, sino también en el historial evolutivo registrado en el material genético de todos los seres vivos.

En ese sentido, el estudio de los ribosomas, las máquinas biológicas que utilizan las células para traducir a proteínas la información codificada en los ácidos nucleicos (ADN y ARN), ha resultado especialmente esclarecedor. Los ribosomas están formados por ARN y proteínas. Mediante la comparación de las secuencias de los ARN ribosómicos, se ha construido un árbol genealógico que muestra las relaciones existentes entre todas las formas de vida que

ALGUNOS PREFIEREN EL CALOR

Los análisis del material genético procedente de los organismos existentes refuerzan la hipótesis de que la vida podría haberse originado en un ecosistema de manantiales termales, quizás en uno similar a la Ciudad Perdida. Se ha construido un árbol filogenético basado en secuencias de ARN que muestra las relaciones entre todas las formas de vida que hay sobre la Tierra. Al igual que los metanógenos de la Ciudad Perdida, que pertenecen a la familia de los Methanosarcinales, muchos de los organismos situados cerca de la raíz del árbol habitan en manantiales termales, donde la temperatura es muy elevada (en tierra y en los fondos oceánicos) y subsisten con hidrógeno (*naranja*). Ese patrón sugiere que el último antepasado universal de todas las formas de vida del planeta habitó en un entorno de un tipo parecido.



MELISSA THOMAS (*diagrama de árbol*)

habitan en la Tierra. Muchos de los organismos situados en las ramas próximas a la raíz del árbol consumen hidrógeno y habitan en manantiales hidrotermales, donde el agua alcanza temperaturas muy elevadas, ya sea en tierra o en los fondos oceánicos; ello indica que el último ancestro universal que dio lugar a todas las formas de vida que habitan en la Tierra podría también haber vivido en un manantial de aguas termales, posiblemente en un entorno semejante al del Campo Hidrotermal de la Ciudad Perdida.

Los geólogos tienen motivos para suponer que, en algún momento, abundaran los ecosistemas de la clase de los observados en la Ciudad Perdida. La peridotita es uno de los tipos de roca más comunes en el sistema solar. En la Tierra, constituye la mayor parte del manto superior. Aunque hoy en día no resulta fácil encontrar, sobre la superficie terrestre, peridotita recién formada, hace tres o cuatro mil millones de años era muy abundante. Por aquel entonces, el planeta estaba mucho más caliente y la intensa actividad volcánica transportaba una mayor cantidad de materia desde el manto fundido hacia la superficie. De hecho, la peridotita constituía, probablemente, la mayor parte de las rocas de los fondos oceánicos de la Tierra primitiva.

La peridotita habría reaccionado con el agua tal y como lo hace ahora. Las condiciones de calor y alcalinidad similares a las de la Ciudad Perdida podrían, por tanto, haber dado lugar a las primeras formas de vida. Por el contrario, condiciones como las de los humeros negros, con temperaturas abrasadoras y un medio ácido, probablemente habrían resultado demasiado hostiles para propiciar la aparición de la vida.

Los hallazgos de la Ciudad Perdida refuerzan también las hipótesis sobre otros lugares de nuestro sistema solar y sus posibilidades de albergar vida o haberlo hecho en el pasado. Cualquier planeta o luna que contenga peridotita y agua líquida (los ingredientes necesarios para la serpentinización) albergaría, en potencia, formas de vida análogas a los microorganismos de la Ciudad Perdida. Las pruebas más sólidas sobre la existencia de esos compuestos proceden de Marte y de Europa, una de las lunas de Júpiter. De hecho, ya se ha detectado metano en la atmósfera marciana actual. Ignoramos, no obstante, si procede de la actividad microbiana, de las reacciones químicas que tienen lugar en las rocas del planeta o de ambas.

El origen del metano

Establecer esa procedencia puede resultar más difícil de lo que se había previsto. En el árbol de la vida, la mayoría de los integrantes son microorganismos. Aunque podemos estudiar las secuencias de su ADN y ARN, hallar un registro fósil de individuos con formas ambiguas no es fácil. Para conseguirlo, durante los últimos decenios se han desarrollado técnicas que permiten estudiar la historia evolutiva de los microorganismos a través de un análisis exhaustivo del registro geológico, pero no en busca de fósiles físicos sino de fósiles químicos.

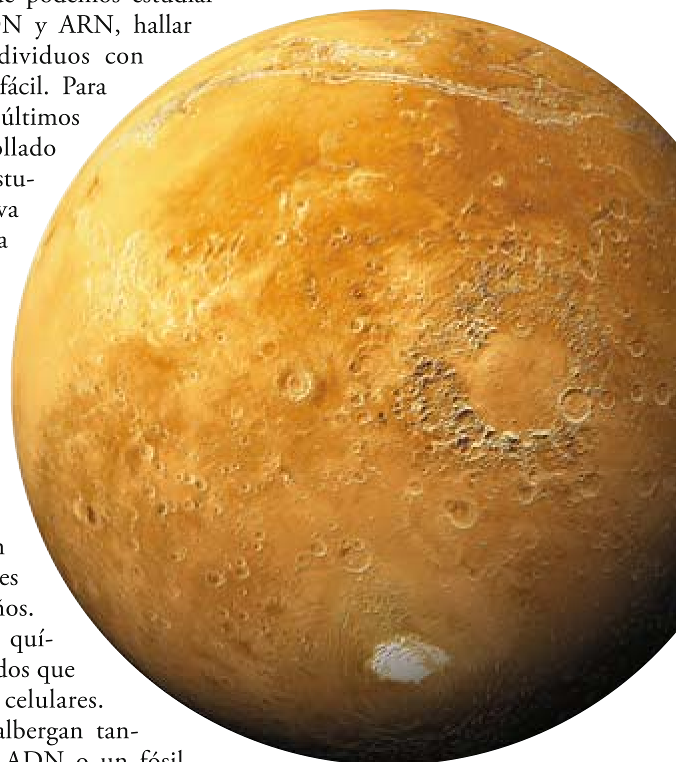
Los fósiles químicos son moléculas que guardan relación con los seres vivos y que se han conservado fosilizados en las rocas durante millones o miles de millones de años. La mayoría de los fósiles químicos procede de los lípidos que forman las membranas celulares. Aunque los lípidos no albergan tanta información como el ADN o un fósil físico, constituyen indicadores fiables de la vida y permiten realizar un diagnóstico estructural sobre el tipo de organismo que los ha producido.

Además, el carbono que forma parte del lípido es una fuente de información, ya que contiene un marcador que indica el modo en que un organismo ha obtenido de su entorno el carbono: nos referimos al carbono 13 (C^{13}), una forma rara del elemento (isótopo) que no se degrada con el tiempo. En la mayoría de los organismos, el carbono contiene entre un 1 y un 3,5 por ciento menos de C^{13} que el carbono que forma parte del CO_2 disuelto en el agua de mar. De ello se infiere que el carbono de las rocas antiguas que muestre esa composición isotópica procede de seres vivos; asimismo, se supone que el carbono que no muestre tal empobrecimiento en C^{13} se generó a través de un proceso abiótico.

Sin embargo, la Ciudad Perdida cuestiona la hipótesis anterior. Mi trabajo junto a un equipo del Instituto de Tecnología de Massachusetts y del Instituto Woods Hole ha demostrado que algunos de los lípidos más abundantes hallados en los carbonatos de la Ciudad Perdida proceden de organismos metanógenos. Unos lípidos que no muestran empobrecimiento en C^{13}: antes bien, su composición isotópica es la que cabría esperar de un material de origen abiótico.

¿Cómo pudo ocurrir? La utilización del C^{13} como un indicador de la vida se basa en

¿HAY VIDA EN MARTE?



Una de las misiones proyectadas para el Laboratorio Científico de Marte, que la NASA tiene previsto lanzar en 2011, consiste en determinar, a partir de la proporción entre C^{12} y C^{13}, si el metano del Planeta Rojo resulta de la actividad biológica. Pero la Ciudad Perdida demuestra que, en determinadas circunstancias, la composición isotópica del carbono no permite averiguar si se trata de un origen biológico o de un origen geológico. Por tanto, un resultado negativo del análisis isotópico del carbono no descartaría la posibilidad de que allí existiese vida.

DETLEV VAN RAVENSWAAY *Photo Researchers, Inc.*

la premisa de la existencia, en el entorno, de más dióxido de carbono disponible del que se puede utilizar. Mientras haya un exceso de dióxido de carbono, los organismos incorporan de preferencia moléculas que contengan C^{12} (más ligeras) y discriminan las de C^{13} (de mayor peso). Pero si por algún motivo escasease el dióxido de carbono, los organismos utilizarían todas las moléculas de dióxido de carbono disponibles, sin importar que se tratase de la variedad ligera o de la pesada. Y si eso fue lo sucedido, la abundancia relativa de C^{13} en los organismos no sería distinta de la de su entorno. El marcador químico de la vida resultaría, pues, invisible.

Ese proceso describe exactamente lo que ocurre en las fumarolas hidrotermales de la Ciudad Perdida. A diferencia de lo que sucede en casi todos los ambientes de la Tierra, donde hay siempre dióxido de carbono, en la Ciudad Perdida predomina el hidrógeno y escasea el dióxido de carbono, lo que obliga a los organismos que allí medran a extraer los isótopos del carbono de manera indiscriminada.

El problema de la invisibilidad se da también con el metano. En condiciones normales, el metano biogénico presenta un empobrecimiento en C^{13}; no así el metano de origen geoquímico. Una diferencia que no se respeta a menudo en los sistemas donde tiene lugar la serpentinización. El metano de las aguas de las fumarolas hidrotermales de la Ciudad Perdida no presenta la sintomática disminución de C^{13}. Los investigadores han observado que ese metano corresponde a una mezcla de productos biológicos y geológicos. Sin embargo, resulta imposible establecer una distinción sólo a partir de los isótopos del carbono.

Si la vida se ha desarrollado en alguna otra parte de nuestro sistema solar, lo más probable es que se trate de metanógenos microbianos que habiten en lugares donde la roca sufra un proceso de serpentinización. Sabemos que en Marte se produce metano. La NASA proyecta lanzar el Laboratorio Científico de Marte en 2011; una de sus misiones consistirá en determinar en ese metano la proporción de los isótopos del carbono. Un empobrecimiento en C^{13} indicaría la existencia de organismos en el Planeta Rojo.

Sin embargo, la Ciudad Perdida demuestra que, si se fracasara a la hora de encontrar dicha señal, difícilmente podría considerarse una prueba de la ausencia de vida. De hecho, el hallazgo de microorganismos en ese tipo de ecosistemas recién descubiertos proporciona todavía más razones para esperar que, algún día, encontraremos señales de vida extraterrestre.

Bibliografía complementaria

LA CRESTA DE LA DORSAL DEL PACIFICO ORIENTAL. K. C. Macdonald y Bruce P. Luyendyk en *Investigación y Ciencia*, págs. 56-71; julio de 1981.

SIMBIOSIS EN LAS PROFUNDIDADES MARINAS. James J. Childress, Horst Felbeck y George N. Somero en *Investigación y Ciencia*, págs. 78-85; julio de 1987.

DAWN IN THE DEEP: THE BIZARRE WORLD OF HYDROTHERMAL VENTS. Richard A. Lutz en *National Geographic*, vol. 203, n.º 2, págs. 92-103; febrero de 2003.

EL METANO EN MARTE Y TITAN. Sushil K. Atreya en *Investigación y Ciencia*, págs. 6-15; julio de 2007.

Sobrepasar los límites planetarios

El control de la natalidad y la producción de alimentos son desafíos que hay que abordar conjuntamente

Jeffrey D. Sachs

Nos estamos comiendo hasta lo que no tenemos. Recientemente, en el número del 24 de septiembre de *Nature*, Johan Rockström y sus colaboradores propusieron 10 "límites planetarios" para circunscribir la actividad humana dentro de márgenes seguros. Estos límites incluyen topes para las emisiones de gases de efecto invernadero, la pérdida de biodiversidad, la conversión global de la superficie terrestre en terreno cultivable y otros impactos enormes en los ecosistemas de la Tierra. Aun así, la humanidad ya ha sobrepasado varios de esos límites y va en camino de exceder la mayoría de los demás. El aumento de la demanda de alimentos desempeña un papel importante en estas transgresiones.

La revolución verde que disparó la producción de cereal dio un respiro a la humanidad, pero el aumento continuo de la población y la demanda de producción de carne están agotando ese colchón. El padre de la revolución verde, Norman Borlaug, que falleció el pasado septiembre a la edad de 95 años, apuntó exactamente lo mismo en 1970 cuando recibió el premio Nobel de la Paz: "No habrá progreso permanente en la batalla contra el hambre mientras las agencias que luchan por aumentar la producción alimentaria y quienes trabajan por el control demográfico no se unan en un esfuerzo conjunto".

Ese esfuerzo conjunto ha sido, como mínimo, inconsistente; a veces, casi inexistente. Desde 1970 la población ha pasado de 3700 millones a 6900 millones y continúa aumentando alrededor de 80 millones al año. La producción de alimento por persona ha disminuido en regiones extensas, en particular en el Africa subsahariana. En India la duplicación de la población ha absorbido casi todo el aumento de producción de cereal.

La producción de alimentos supone un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero, si contamos las de los combustibles fósiles utilizados en el cultivo, preparación y transporte de esos alimentos, el dióxido de carbono liberado a la atmósfera por la preparación del suelo para pasto y labranza, el metano de los arrozales y del ganado rumiante, y el óxido nitroso del uso de abonos.

La producción de alimentos es también responsable de gran parte de la pérdida de biodiversidad por la tala de la superficie forestal. Los abonos químicos provocan sedimentación masiva de nitrógeno y fósforo, que destruyen estuarios en cientos de sistemas fluviales y amenazan la química de los océanos. Alrededor del 70 por ciento del uso mundial de agua se destina a la producción de alimentos, lo que incide en el agotamiento de las aguas subterráneas y en el consumo ecológicamente pernicioso de agua dulce, desde California hasta la llanura indo-gangeática y desde Asia Central hasta el norte de China.



MATT COLLINS

La revolución verde, en suma, no ha anulado los peligrosos efectos colaterales de una población humana creciente, que están abocados a aumentar cuando el número de habitantes sobrepase los 7000 millones alrededor de 2012 y continúe creciendo, como está previsto, hasta los 9000 millones para 2046. El consumo de carne per cápita aumenta también. La carne de vacuno representa el mayor problema porque el ganado requiere hasta 16 kg de cereales para pienso por kilo de carne consumida, emite grandes cantidades de metano, y el abono utilizado para cultivar su alimento contribuye a potenciar la concentración de óxidos de nitrógeno.

Producir más alimentos no es suficiente; debemos estabilizar simultáneamente la población mundial y reducir las consecuencias ecológicas de la producción de comida: un triple reto. Una reducción voluntaria rápida de la tasa de fertilidad en los países pobres, inducida por un mayor acceso a la planificación familiar, una menor mortalidad infantil y educación para las niñas, podría estabilizar la población en alrededor de 8000 millones para 2050.

Los pagos a comunidades pobres para evitar la deforestación podrían salvar hábitats de especies. La siembra sin laboreo y otros métodos pueden preservar suelos y biodiversidad. Un uso más eficiente de los abonos puede reducir la liberación de nitrógeno y fósforo. Con una mejor irrigación y más variedades de semillas se puede ahorrar agua y reducir otras presiones ecológicas. Y un cambio en la dieta tendente a no comer carne de vaca conservaría los ecosistemas y mejoraría la salud humana.

Estos cambios requerirán un gigantesco esfuerzo público y privado, pero aún no se ha empezado la necesaria movilización. Recordando los grandes logros de Borlaug, debemos redoblar nuestros esfuerzos para dar respuesta a sus admoniciones. Las puertas que conducen a un desarrollo sostenible se están cerrando.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

Formas cambiantes

Xavier Aurell Bach

En medio de la bahía de Rosas (noreste de España), extendida entre los acantilados graníticos y esquistosos del cabo de Creus y los relieves carbonatados del macizo del Montgrí, se encuentra la playa de San Pedro Pescador. La bahía presenta extensas acumulaciones de arenas, que, en gran parte, han sido transportadas y sedimentadas por tres ríos: Muga, Fluvià y Ter.

Los sedimentos que vierten los ríos al mar son devueltos a tierra por las olas, que los acumulan sobre la playa. En la formación de la playa intervienen también las corrientes marinas, la deriva litoral, las corrientes de resaca, la morfología de la costa y del fondo marino y los vientos. La fisonomía de la playa cambia a lo largo del año.

El viento de tramontana es responsable de las dunas de mayor tamaño y persistentes de la playa de San Pedro Pescador. Procedente del norte, ese viento da carácter a la zona, sobre todo por su intensidad. Su fuerza lo convierte en poderoso agente de transporte de sedimentos hacia el sur. Debido a la forma arqueada de la bahía, parte de los sedimentos se depositan en el mar o en el extremo sur de la misma; ello origina dunas en Ampurias, que llegan a rebasar el macizo del Montgrí y alcanzan la playa de Pals.

1. Duna generada por el viento de tramontana. Presenta dos flancos asimétricos característicos: uno de pendiente suave, que mira a barlovento, por donde sube la arena transportada por el viento, y otro más empinado, que mira a sotavento, por donde desciende la arena por efecto de la gravedad.





2. El avance de la duna, impulsada por la tramontana, genera estructuras dunares residuales.

3. Algunas dunas se forman delante o detrás de un obstáculo. El viento origina también ondulaciones de menor tamaño (*ripples*).



4. Estructuras que origina el viento al chocar con conchas de moluscos.

EL SISTEMA SURFACTANTE PULMONAR

Un complejo lipoproteico sintetizado y secretado por el epitelio pulmonar resulta esencial para mantener abierta la superficie respiratoria y defenderla frente a la entrada de organismos patógenos

Jesús Pérez Gil

CONCEPTOS BASICOS

- El surfactante pulmonar forma en la interfase aire-líquido respiratoria una película que reduce la tensión superficial y estabiliza la gran superficie de intercambio gaseoso del pulmón a lo largo de los ciclos de inspiración-espiración. Además, establece una barrera de defensa innata frente a la entrada de microorganismos.
- Las proteínas hidrofóbicas del surfactante resultan esenciales para la formación y dinámica de la película tensioactiva interfacial en el pulmón. La falta de un surfactante operativo se asocia al desarrollo de trastornos respiratorios graves.
- Los pacientes deficientes en surfactante se tratan mediante surfactantes exógenos, obtenidos, sobre todo, de fuentes animales. Se están desarrollando nuevas versiones humanizadas a partir de proteínas del surfactante humano y fosfolípidos sintéticos.

La obtención de la energía necesaria para mantener las funciones celulares requiere un aporte continuo de oxígeno a los tejidos. En los vertebrados de respiración aérea, los pulmones son los órganos encargados de facilitar el intercambio de gases entre el aire y el torrente circulatorio.

El epitelio pulmonar constituye una estructura altamente especializada; sitúa entre el aire que respiramos y la sangre que fluye por los capilares sanguíneos una barrera cincuenta veces más fina que una hoja de papel. A través de esa barrera se realiza la difusión del oxígeno, que es transportado a los tejidos por la hemoglobina de los eritrocitos, y la liberación al ambiente del dióxido de carbono producido, como desecho metabólico.

Para obtener el oxígeno necesario, un pulmón humano debe exponer al intercambio gaseoso con el exterior una superficie equivalente a la que ocupa una cancha de tenis y forzar la renovación del aire en contacto con esa superficie, a razón de unos 11.000 litros de aire por día. Y ello siete días a la semana y 365 días al año, en actividad o reposo, durante vigilia o sueño. La estructura del pulmón está optimizada para realizar sin desmayo un trabajo físico y mecánico de semejante calibre, siendo una parte esencial de esa estructura la existencia de una sustancia lubricante de naturaleza lipoproteica en la superficie respiratoria: el surfactante pulmonar.

La función primaria del sistema surfactante consiste en facilitar la mecánica respiratoria, minimizando la energía que el tejido pulmonar debe aportar para mantener abierta y expuesta la superficie de intercambio gaseoso durante los sucesivos ciclos de inspiración-espiración. Pero, además, el sistema surfactante cumple otra función igualmente esencial, ya que muchos de sus componentes moleculares forman parte de mecanismos de defensa innatos que constituyen una primera barrera a la entrada de microorganismos patógenos.

Las necesidades respiratorias hacen que el epitelio pulmonar sea la mayor superficie del organismo expuesta al entorno y, por tanto, un punto débil en la muralla defensiva que el organismo interpone con el medio. El epitelio respiratorio es, con frecuencia, la puerta de entrada de infecciones causantes de numerosas enfermedades (virus, bacterias, hongos y parásitos); asimismo, su exposición a alérgenos está asociada al desarrollo de un gran número de alergias, y puede ser víctima de la toxicidad asociada a la inhalación de contaminantes atmosféricos.

El complejo surfactante es producido y secretado por un determinado tipo celular especializado del epitelio alveolar: los neumocitos de tipo II. Una vez secretado, el surfactante crea una película superficial en el epitelio, en contacto con el aire. Desde ahí cumple su doble función: estabilizar la superficie pulmonar



frente a las fuerzas físicas desarrolladas por la mecánica respiratoria y bloquear el acceso de patógenos a las células epiteliales y, a través de éstas, a los capilares sanguíneos y el resto del organismo.

Estructura molecular

La composición del sistema surfactante se ha estudiado sobre todo a partir del análisis del material obtenido de lavados alveolares de pulmones animales. En esos lavados se obtiene una muestra de los componentes presentes en los espacios respiratorios, secretados por los tipos celulares que tapizan las vías aéreas.

El surfactante puede considerarse un complejo lipoproteico. En los pulmones de mamíferos, el 90 por ciento en peso del surfactante corresponde a material lipídico; entre el 8 y el 10 por ciento, a proteínas. Dentro de los componentes lipídicos, los fosfolípidos suponen un 90 por ciento; el resto son lípidos neutros, entre los que destaca una proporción notable de colesterol. Cabe resaltar la presencia, entre los fosfolípidos, de una especie molecular inusual en cualquier otro tejido, la dipalmitoilfosfatidilcolina (DPPC), que constituye más del 40 por ciento del surfactante.

Las fosfatidilcolinas (PC) son los componentes lipídicos principales en la mayoría de las membranas de las células animales. La mayoría de las PC de membrana poseen un ácido graso saturado y otro insaturado. Esta combinación de ácidos grasos ofrece propiedades óptimas de fluidez a la temperatura fisiológica, que aseguran que en el seno de la membrana los lípidos y las proteínas puedan moverse y organizarse

1. EL PULMON constituye el órgano respiratorio de los vertebrados terrestres y la mayor superficie de contacto entre éstos y el entorno. La respiración depende críticamente de la estabilización de la superficie de intercambio gaseoso frente a fuerzas físicas que tienden a su colapso.

de una forma dinámica, interaccionar entre sí y con otras moléculas y realizar sus funciones. La DPPC, en cambio, posee dos cadenas de ácido graso saturadas, lo que resulta esencial para la función del surfactante, como se verá más adelante. Tanto es así que los neumocitos poseen rutas metabólicas especiales destinadas a producir estas especies disaturadas que no aparecen en proporción tan elevada en el resto de los tejidos.

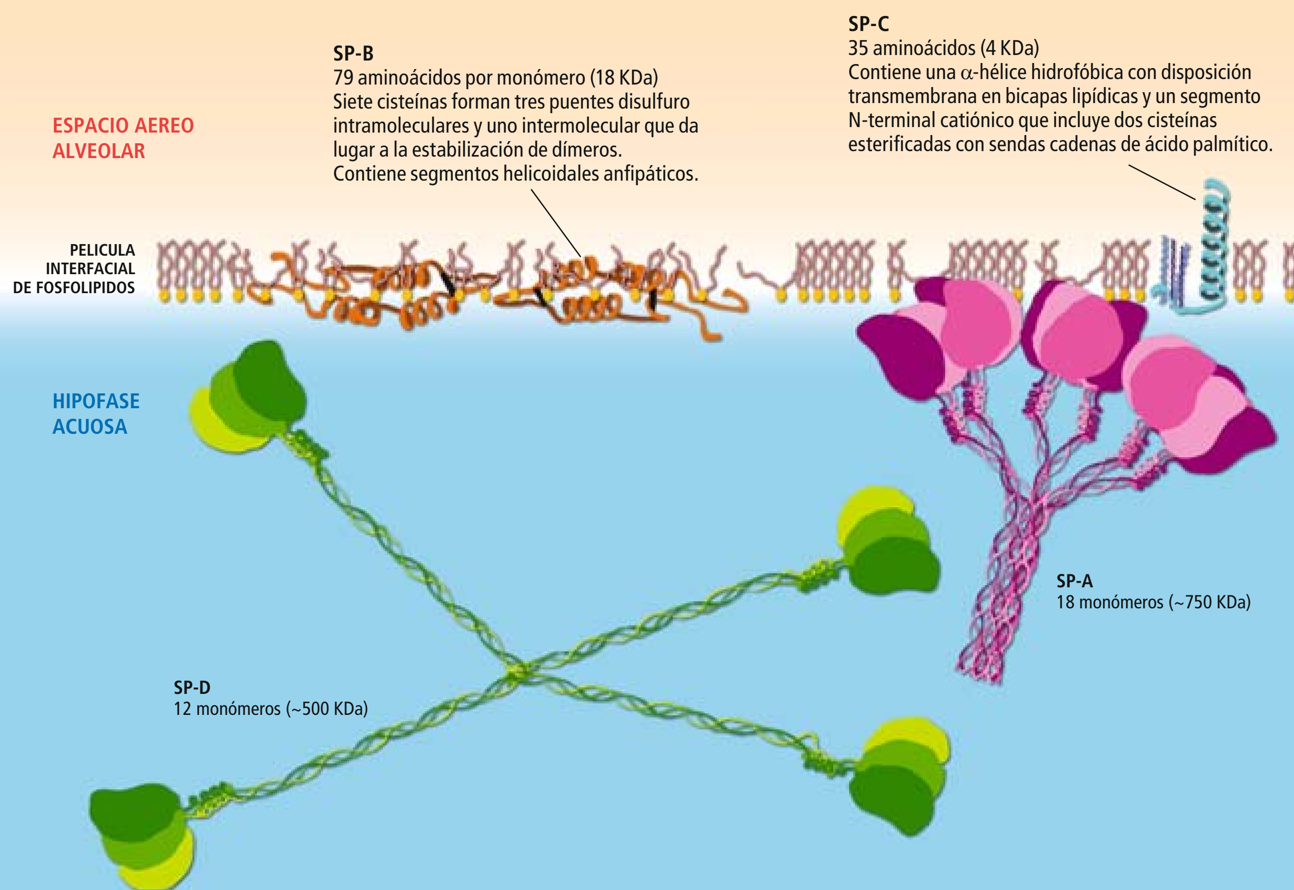
Hay otra especie fosfolipídica que aparece en una proporción notable en el surfactante y no en otros tejidos. Se trata del fosfatidilglicerol (PG), un componente frecuente en células vegetales pero no en las membranas de células animales. El PG, como el fosfatidilinositol (PI), es un fosfolípido aniónico, esto es, con una cabeza polar dotada de carga negativa a *p*H fisiológico. En el surfactante pulmonar, el conjunto de PG y PI puede suponer una proporción de entre el 10 y el 15 por ciento en peso.

En el surfactante aparecen también una serie de proteínas más o menos específicas: SP-A (del inglés "Surfactant Protein A"), SP-B, SP-C y SP-D. Estas cuatro proteínas se agrupan en dos familias en función de su estructura y propiedades, así como por su participación en los procesos que se desarrollan en los espacios alveolares. SP-A y SP-D son hidrofílicas y forman oligómeros de gran tamaño; pertenecen al grupo de las colectinas y contienen en su estructura dominios con actividad lectina con capacidad de reconocer y unirse a ciertas cadenas oligosacarídicas en presencia de calcio. SP-A y SP-D cumplen funciones fundamentales en los mecanismos de defensa innata del pulmón.

Por otro lado, SP-B y SP-C son polipéptidos catiónicos de tamaño reducido; su elevado carácter hidrofóbico hace que sean solubles en disolventes orgánicos, por lo que se copurifican junto con los lípidos cuando se realiza una extracción orgánica del material surfactante. La proteína SP-B corresponde a un dímero; cada uno de los monómeros (de 79 aminoácidos) proviene de la maduración proteolítica de un precursor proSP-B de 358

PROTEINAS DEL SURFACTANTE PULMONAR

Asociadas al surfactante pulmonar aparecen cuatro proteínas específicas SP (de "Surfactant Protein") agrupadas en dos familias. SP-A y SP-D son hidrofílicas y pertenecen al grupo de las colectinas; presentan regiones de tipo colágeno y dominios globulares con actividad lectina (con capacidad para reconocer y unirse a ciertas cadenas oligosacarídicas) y forman oligómeros de gran tamaño. Participan en la defensa innata del pulmón. SP-B y SP-C son hidrofóbicas y constan de polipéptidos catiónicos de tamaño reducido; se asocian, junto con los lípidos del surfactante, a la interfase aire-líquido alveolar. Determinan las propiedades biofísicas de los lípidos del surfactante.



TODAS LAS ILUSTRACIONES SON CORTESIA DEL AUTOR

residuos. SP-C tiene sólo 35 residuos; resulta del procesamiento de un precursor de casi 200 aminoácidos. La estructura de los precursores proSP-B y proSP-C está probablemente optimizada para proteger la secuencia activa de las proteínas hasta el momento y localización en que éstas deben ensamblarse en el surfactante. Una vez integradas, SP-B y SP-C desarrollan una función fundamental en la modulación de las propiedades biofísicas de los lípidos del surfactante.

Función estructural: el problema de la tensión superficial

La necesidad de un sistema surfactante surge en el momento de la evolución en que se establece la respiración aérea. En los animales acuáticos, la superficie de contacto entre el organismo y el entorno responde esencialmente a las propiedades de una interfase líquido-líquido, a través de la cual las moléculas pueden difundir, entrar o salir del organismo en función de las interacciones moleculares con las estructuras de frontera. La salida a tierra de los vertebrados supone la aparición de una frontera física, la interfase aire-líquido, con propiedades químico-físicas especiales que no pueden soslayarse, como la existencia de tensión superficial.

Las moléculas de agua en fase líquida establecen entre sí una serie de interacciones polares muy dinámicas, que están intercambiándose de manera continua. El componente energético de esas interacciones en el seno de la fase acuosa se encuentra equilibrado en todas las direcciones del espacio. Sin embargo, las moléculas de agua que se hallan en la superficie, en contacto con el aire, sólo pueden establecer interacciones con las moléculas de agua de la fase acuosa. Esas moléculas superficiales se hallan, por tanto, sometidas a un componente neto cohesivo con el resto de las moléculas de la fase acuosa.

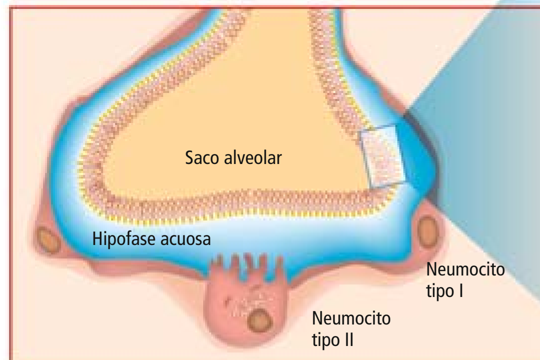
El fenómeno descrito significa que la apertura o ampliación de una interfase aire-agua entraña un coste energético, correspondiente a las interacciones que las moléculas de agua no pueden establecer una vez trasladadas a la superficie. Esta energía, la tensión superficial, es del orden de 17 mcal/m^2 (70 mN/m) para el agua pura a 25 ºC. El lector puede imaginarse fácilmente el efecto, si recuerda lo que cuesta abrir una bolsa de plástico mojada: exactamente el trabajo necesario para compensar la tensión superficial de la superficie abierta.

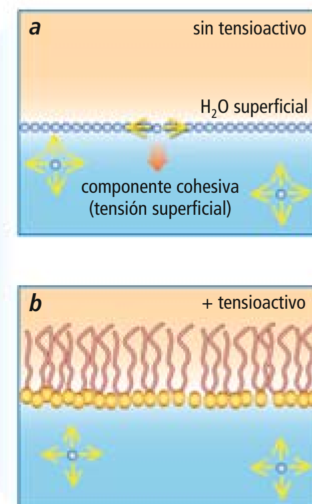
Traslademos el problema a la superficie respiratoria del pulmón. Hemos aludido a la notable extensión de la superficie necesaria para el intercambio gaseoso. Esta superficie posee además otras dos características críticas. La primera es que está “mojada”: sobre el epitelio alveolar existe una fina capa acuosa capilar, exudada desde el líquido intersticial. La segunda es que la superficie cambia de extensión cíclicamente, como consecuencia de la dinámica respiratoria que hace que durante la inspiración los pulmones se inflen (máxima extensión de la superficie alveolar) y se vacíen en la espiración (mínima superficie alveolar). Del mismo modo que cuesta trabajo abrir una bolsa mojada, el pulmón necesitaría una aportación continua de energía para vencer la tensión superficial que se opone a la apertura de los espacios alveolares en cada inspiración.

Los alvéolos pulmonares difieren en tamaño. No todos se vacían y llenan de manera simultánea, con los problemas físicos que eso conlleva. La presión que tiende a cerrar un alvéolo idealmente esférico, como consecuencia de la tensión superficial, está definida por la Ley de Laplace, $P = 2\gamma/r$, donde P corresponde a la presión de vaciado de la cámara esférica, γ a la tensión superficial y r al radio de curvatura del alvéolo. Cuanto mayor es γ y menor r, mayor es P, la tendencia al cierre o colapso del alvéolo. Según este modelo, si dos alvéolos de diferente tamaño están conectados, existiría una diferencia de presión que conduciría al vaciado del menor sobre el mayor, lo que podría llevar al colapso progresivo de los espacios aéreos pulmonares.

A partir de las consideraciones anteriores pueden comprenderse los beneficios de la pro-







2. TENSION SUPERFICIAL Y ACTIVIDAD TENSIOACTIVA. En ausencia de tensioactivos, las moléculas de agua en la superficie de contacto con el aire tienen un componente neto cohesivo, la tensión superficial, que resulta de la falta de interacciones con la fase aérea (*a*). Los tensioactivos como las moléculas secretadas por el epitelio alveolar son compuestos anfipáticos; su disposición en la interfase aire-líquido desplaza las moléculas de agua superficiales (*b*).

El autor

Jesús Pérez Gil es catedrático del departamento de bioquímica y biología molecular en la facultad de biología de la Universidad Complutense de Madrid. Lleva más de veinte años investigando sobre el sistema surfactante pulmonar.

ducción en el pulmón de un sistema tensioactivo, es decir, de un sistema que reduce la tensión superficial. Las moléculas tensioactivas presentan una estructura anfipática: contienen a la vez una parte hidrofílica y otra hidrofóbica. Ello facilita la orientación de las moléculas en la interfase aire-líquido, de forma que ofrecen la parte hidrofílica al establecimiento de interacciones polares con el agua y dirigen la parte hidrofóbica hacia el aire. Cuantas más moléculas de tensioactivo se sitúan en la interfase, mayor número de moléculas de agua son liberadas a la fase acuosa y menor es la tensión superficial.

Compuestos típicamente tensioactivos son los detergentes, cuyas propiedades se basan en el carácter anfipático de su estructura. La capacidad tensioactiva de los detergentes conduce a la formación de espumas, consecuencia de la estabilización de grandes extensiones de interfase aire-líquido.

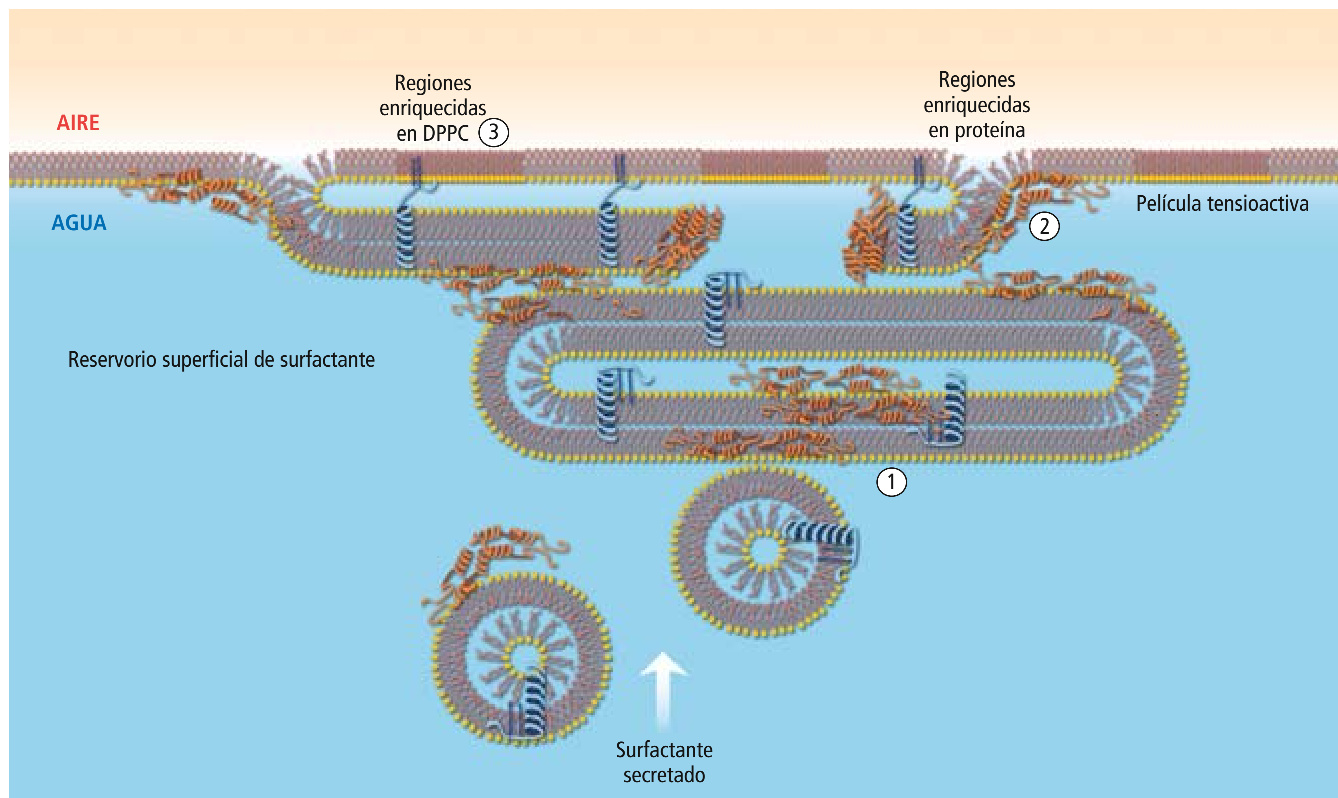
Volviendo al ejemplo de la bolsa de plástico mojada, el lector puede comprobar que, si a la bolsa mojada se le añaden unas gotas de detergente, ésta puede abrirse una y otra vez sin gran esfuerzo. El surfactante pulmonar constituye el sistema tensioactivo optimizado evolutivamente en el epitelio alveolar para minimizar la energía necesaria para mantener abiertos los espacios aéreos respiratorios.

Los principales agentes tensioactivos del surfactante son sus componente fosfolipídicos, con capacidad para formar películas interfaciales gracias a su estructura anfipática. Los fosfolípidos del surfactante, una vez secretados por los neumocitos de tipo II a los espacios aéreos, se adsorben a la interfase aire-agua, donde reducen la tensión superficial. El surfactante pulmonar tiene una propiedad que lo convierte en un tensioactivo extremadamente eficaz: el descenso que produce en la tensión superficial es tanto mayor cuanto más se reduce el volumen de los alvéolos durante la espiración. Merced a ese fenómeno, la relación γ/r persiste constante y no hay diferencias de presión que tiendan al colapso de los alvéolos.

La razón de ese fenómeno es la casi absoluta insolubilidad de los lípidos del surfactante en la fase acuosa. Conforme se reduce la superficie respiratoria durante el vaciado pulmonar, las moléculas fosfolipídicas quedan confinadas en una extensión de interfase progresivamente menor; aumenta, por tanto, su concentración y se reduce la tensión superficial al excluirse un mayor número de moléculas de agua de la superficie.

La presencia de un fosfolípido disaturado (DPPC) como elemento tensioactivo principal del surfactante resulta muy ventajosa. A diferencia de lo que ocurre con las cadenas insaturadas, donde los dobles enlaces fuerzan la presencia de acodamientos, las cadenas de ácidos grasos saturados pueden adoptar configuraciones casi lineales. Así, en los momentos de máxima compresión de la superficie respiratoria (al final de la espiración), las moléculas

3. MECANISMOS MOLECULARES DE LAS PROTEINAS SP-B y SP-C en la actividad superficial del surfactante. Las proteínas hidrofóbicas SP-B y SP-C desempeñan varias funciones: promueven la interacción entre las bicapas de surfactante secretado y las películas interfaciales (*1*), perturban las estructuras de tipo bicapa para favorecer la transferencia a la interfase aire-líquido de las moléculas tensioactivas (*2*), facilitan la formación en la película interfacial de regiones enriquecidas en DPPC (el único componente del surfactante que reduce casi a cero la tensión superficial) al final de la espiración (*3*) y, por fin, posibilitan la reextensión de la película surfactante interfacial durante la inspiración.



de DPPC pueden empaquetarse densamente en la interfase, haciendo descender la tensión superficial hasta valores inferiores a 2 mN/m. Esa drástica reducción de la tensión superficial impide que los alvéolos se colapsen y permite que vuelvan a abrirse sin esfuerzo al iniciarse la inspiración. Los fosfolípidos insaturados no serían tan eficaces, pues los acodamientos de sus cadenas de ácido graso impondrían un límite al máximo empaquetamiento posible durante la compresión. (Una película interfacial de palmitoiloleoilfosfatidilcolina, POPC, una especie habitual en las membranas de la mayoría de los tejidos, no puede alcanzar tensiones superficiales inferiores a 20 mN/m, lo que sería insuficiente para estabilizar el pulmón.)

Hemos visto que la DPPC es un tensioactivo muy eficaz. Sin embargo, algunas de las propiedades fisicoquímicas que le permiten relajar la tensión superficial hasta valores casi nulos son contraproducentes para una formación suficientemente rápida de películas tensioactivas interfaciales. La longitud y el carácter disaturado de las cadenas de ácido graso de la DPPC hacen que, a temperatura fisiológica, el fosfolípido no adopte un estado fluido sino un estado semirrígido (gel). En esas condiciones, la DPPC no tiende a transferirse a la interfase aire-líquido, proceso imprescindible para reducir la tensión superficial.

Por ese motivo, el surfactante no puede consistir en DPPC pura y entran en juego el resto de las especies lipídicas del surfactante y sobre todo, las proteínas hidrofóbicas SP-B y SP-C. Cuando los neumocitos sintetizan el surfactante, éste se dispone y almacena en estructuras de tipo bicapa, como ocurre con la mayoría de los sistemas fosfolipídicos celulares. Tales bicapas lipídicas, que contienen un 50 por ciento de DPPC, constituyen el material que es secretado por los neumocitos a la fina película acuosa del epitelio respiratorio. La fracción de fosfolípidos insaturados contribuye a fluidificar las membranas ricas en DPPC para que transiten con mayor facilidad hasta la interfase.

Las proteínas SP-B y SP-C son los verdaderos catalizadores de la transferencia de las moléculas tensioactivas, fundamentalmente la DPPC, desde las estructuras lipoproteicas en que el surfactante se secreta hasta la interfase aire-líquido alveolar. Se desconocen en gran medida los mecanismos moleculares mediante los cuales operan esas proteínas. Nuestro grupo de investigación viene trabajando en su elucidación desde hace años. Se ha determinado que la acción de esas proteínas requiere la presencia del PG, el fosfolípido aniónico del surfactante, probablemente mediante la formación de un complejo específico entre las proteínas, de carácter catiónico, y este fosfolípido.

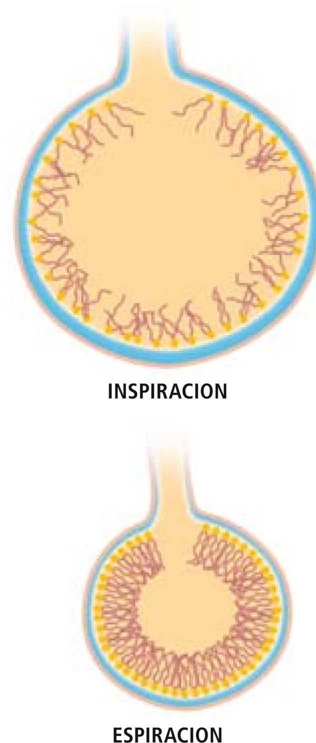
Según el modelo en boga, las proteínas hidrofóbicas del surfactante participan en tres procesos. Por un lado, establecen interacciones entre las estructuras secretadas del surfactante y las películas interfaciales, como paso previo a la transferencia de lípidos tensioactivos a la interfase. Por otro, perturban la estructura de las bicapas favoreciendo la formación de los intermedios necesarios para que las moléculas de DPPC pasen a la interfase. Y además, cuando se produce la compresión de la superficie respiratoria (espiración), las proteínas hidrofóbicas estabilizan la película interfacial en el estado que reduce al máximo la tensión superficial. Cuando la interfase vuelve a expandirse (inspiración), las proteínas facilitan una reextensión adecuada de las moléculas lipídicas, para que vuelva a formarse la película tensioactiva preparada para un nuevo ciclo respiratorio.

Una idea del carácter esencial de SP-B y SP-C lo da el efecto fisiológico de mutaciones que conducen a la desactivación de los genes que codifican estas proteínas. La desactivación del gen de la SP-B (bien en modelos animales "knock-out" o debido a mutaciones naturales) permite el desarrollo fetal a término, pero causa la aparición de un fallo respiratorio agudo, irreversible y letal, en el momento del nacimiento, cuando debe establecerse la respiración aérea, debido a la imposibilidad de mantener los pulmones abiertos. Es la dramática consecuencia de la falta de un surfactante en la interfase aire-líquido y la acción inexorable de la tensión superficial.

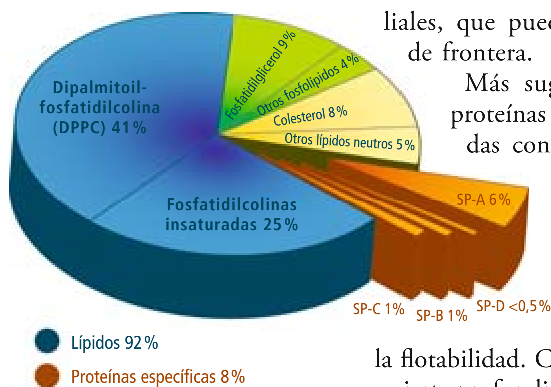
Un cuidadoso examen de esos casos revela que la falta del producto de expresión del gen de SP-B va acompañada de la ausencia de SP-C. Ello indica que, aunque ambas proteínas proceden de genes distintos, el procesamiento de los precursores hasta las formas maduras funcionales está interconectado. En los casos en que se ha desactivado la expresión del gen de la SP-C, los neonatos (que poseen al menos SP-B en sus pulmones) sí logran establecer la interfase respiratoria al nacer, pero desarrollan a largo plazo problemas respiratorios crónicos, en muchos casos también letales, como consecuencia, al menos en parte, de una estabilización defectuosa de la superficie respiratoria.

Evolución del sistema surfactante

Un sistema surfactante primitivo de composición fundamentalmente fosfolipídica recubre la superficie del epitelio digestivo de todos los vertebrados. Ese surfactante no tiene una función biofísica tan refinada como el pulmonar, pero podría ser un vestigio de un surfactante primigenio, elaborado por los tejidos epite-



4. REDUCCION DE LA TENSION SUPERFICIAL durante la compresión alveolar. Cuando se reduce el área que ocupa la interfase aire-agua de los alvéolos (espiración), las moléculas de dipalmitoilfosfatidilcolina (DPPC) se empaquetan más estrechamente; excluyen, por tanto, un mayor número de moléculas de agua de la superficie y reducen en mayor grado la tensión superficial, hasta casi anularla.



5. COMPOSICION del surfactante pulmonar.

liales, que pueden considerarse superficies de frontera.

Más sugerente es la existencia de proteínas filogenéticamente relacionadas con las proteínas SP-A y SP-B del surfactante pulmonar, en el epitelio de la vejiga natatoria de los peces. La vejiga natatoria no es más que un saco de aire que se infla o desinfla para regular la flotabilidad. Cuando los peces se sumergen a cierta profundidad, la vejiga se cierra debido a la presión hidrostática; cuando los peces ascienden, vuelve a llenarse de aire. Ello sugiere que el sistema surfactante podría haber evolucionado como tensioactivo en ese epitelio, con el objetivo de facilitar la apertura de esa primera interfase aire-líquido. Los peces pulmonados, primeros vertebrados con capacidad para establecer respiración aérea, habrían utilizado ese órgano, ese epitelio y ese sistema tensioactivo, para desarrollar la base anatómica y fisiológica del pulmón.

En el pulmón de los anfibios, reptiles y aves aparece un surfactante cuya composición difiere en cierta medida del surfactante de los mamíferos, pero cuya función principal sería también mantener los espacios aéreos abiertos al intercambio gaseoso durante la dinámica respiratoria.

Fisiopatología

La falta de un sistema surfactante operativo conduce a problemas respiratorios severos, como consecuencia de la dificultad para mantener abiertos los espacios pulmonares. Es lo que puede ocurrir a los niños que nacen prematuramente antes de la semana 35 de gestación. El surfactante es uno de los últimos sistemas en madurar a lo largo del desarrollo fetal; lo hace cuando el feto se está preparando para el parto, momento en que debe cambiar su forma de obtener el oxígeno (no será nunca más a través del cordón umbilical y sí a través del epitelio pulmonar).

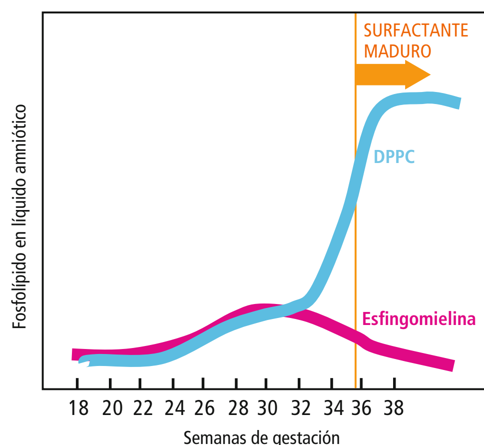
La síntesis y acumulación de DPPC, el principal componente tensioactivo del surfactante, se dispara alrededor de la semana 35 de gestación, pocas semanas antes del nacimiento. También en esas últimas semanas se dispara la síntesis de PG y de las proteínas específicas del surfactante. Cuando un bebé nace antes de que sus pulmones dispongan de un surfactante funcional, tiene enormes dificultades para desalojar el líquido amniótico que rellena sus pulmones y poder respirar a través de ellos. Si se fuerza la ventilación de sus vías aéreas, la fragilidad de los tejidos en esas primeras horas de vida desencadena múltiples problemas derivados del daño pulmonar asociado.

El umbral de supervivencia de los recién nacidos prematuros experimentó un aumento espectacular a finales del decenio de los ochenta del siglo pasado, cuando se comprobó que bastaba administrar a esos niños con pulmones inmaduros, en el momento justo de su nacimiento, una dosis de material surfactante exógeno; ello les permitía abrir sus pulmones sin dificultad y hacía que el inicio de la ventilación pulmonar estimulara la producción de su propio surfactante.

La terapia con surfactante exógeno es hoy una técnica rutinaria en los servicios de neonatología de los grandes hospitales. La mayoría de las preparaciones de surfactante que se utilizan con este fin son de origen animal; contienen distintas mezclas fosfolipídicas, más las proteínas hidrofóbicas SP-B y SP-C. Un reto de la investigación actual en esta área es la producción de proteínas hidrofóbicas humanas de origen recombinante para desarrollar surfactantes artificiales "humanizados".

Otras disfunciones patológicas del sistema surfactante no tienen todavía una fácil solución. Existen numerosas alteraciones de muy diverso origen que generan daños en el tejido pulmonar, en niños y en adultos, asociados con frecuencia a procesos de inflamación y a la liberación a los espacios alveolares de componentes plasmáticos (edema). Ello conduce a la desactivación del sistema surfactante, lo que origina los problemas de mecánica respiratoria mencionados, que pueden agravarse cuando se fuerza la apertura de las vías aéreas mediante ventilación asistida.

El síndrome de distrés respiratorio agudo (ARDS), que se desarrolla como consecuencia del daño pulmonar, constituye la principal causa de mortalidad y morbilidad en las unidades de cuidados intensivos de nuestros hospitales. La administración de un material surfactante exógeno a pacientes afectados produce sólo un efecto transitorio, entre otras razones porque



6. MADURACION DEL SISTEMA SURFACTANTE en el desarrollo fetal. Los niveles de DPPC (principal componente tensioactivo del surfactante pulmonar) y de las proteínas específicas del surfactante se disparan alrededor de la semana 35 en la gestación humana. Sólo a partir de ese momento, no antes, el pulmón del feto está preparado para establecer la respiración aérea.

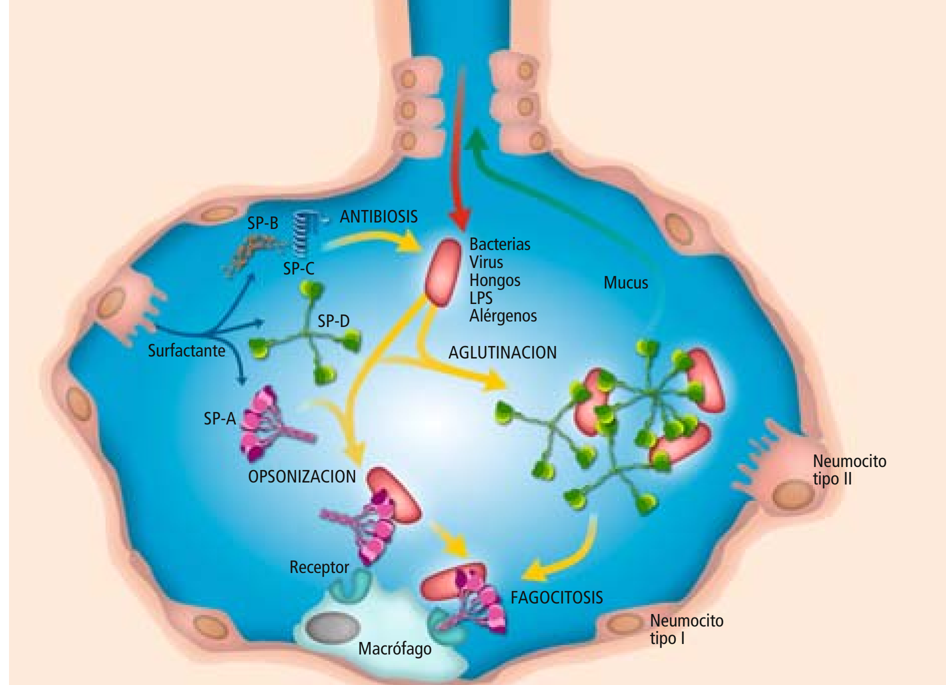
este material resulta también inactivado. El estudio de los mecanismos moleculares de la acción surfactante y de su inhibición por agentes fisiopatológicos es, por tanto, una prioridad en esta área de investigación, ya que ha de permitir el diseño y producción de nuevos materiales surfactantes exógenos, resistentes a la inactivación, de potencial aplicación terapéutica en medicina respiratoria.

Mecanismos de defensa del pulmón

La extensa superficie de contacto que el epitelio respiratorio expone al medio externo exige la concurrencia de diversos mecanismos de defensa que eviten la entrada masiva de organismos patógenos. En los espacios alveolares coexisten mecanismos de defensa innatos (no mediados por anticuerpos) y mecanismos adaptativos (mediados por anticuerpos). Algunos de esos mecanismos han evolucionado de forma simultánea con el sistema surfactante.

Las proteínas SP-A y SP-D desarrollan funciones importantes en los mecanismos de defensa innatos. Los múltiples centros de unión a carbohidratos reunidos en las estructuras de SP-A y SP-D permiten la unión de esas proteínas a ciertos azúcares de la superficie de organismos patógenos, que quedan así señalados para su eliminación de las vías aéreas. La SP-D induce una aglutinación masiva de microorganismos, que posteriormente pueden ser eliminados en el mucus expulsado por las células ciliares a través de las vías respiratorias altas. La unión de SP-A opsoniza (marca para su posterior destrucción) muchas bacterias y virus, que luego son fagocitados por las células del sistema inmunitario innato (macrófagos y monocitos) de los espacios alveolares. Esas células poseen receptores específicos para la región colagenosa de estas colectinas. La importancia de dichas proteínas para mantener el epitelio respiratorio estéril de patógenos se manifiesta en animales en los que se ha desactivado el gen de SP-A o de SP-D. Se trata de animales extraordinariamente sensibles a la infección por patógenos como *Streptococcus, Hemophilus influenza, Pseudomonas aeruginosa* o el virus respiratorio sincitial.

Una superficie tan expuesta a agentes exógenos como el epitelio respiratorio se muestra también altamente proclive a desarrollar respuestas inflamatorias. Una respuesta proinflamatoria exacerbada se halla en la base de patologías respiratorias como el asma. La colectina SP-A presenta una afinidad elevada para unirse al lipopolisacárido (LPS), una molécula con gran actividad proinflamatoria presente en la envoltura de las bacterias Gram negativas. La proteína hidrofóbica SP-C también se halla capacitada para unirse al LPS con elevada especificidad. SP-A y SP-C podrían así contribuir a la eliminación del LPS por rutas que no disparan respuestas inflamatorias.



7. MECANISMOS DE DEFENSA INNATA asociados al surfactante pulmonar. Las colectinas SP-A y SP-D reconocen y se unen a ciertos azúcares de la superficie de organismos patógenos, marcándolos para su eliminación. Los macrófagos alveolares poseen receptores específicos para las regiones colagenosas de SP-A y SP-D, de manera que estas proteínas estimulan la fagocitosis de los patógenos por parte de las células de defensa. La SP-D aglutina un gran número de microorganismos, que son en gran parte eliminados por las vías aéreas superiores. SP-B y SP-C desarrollan una actividad antibiótica sobre diversos microorganismos; ello sugiere también su participación en mecanismos de defensa innatos.

La posible participación de otros elementos del surfactante en mecanismos adicionales de defensa del epitelio pulmonar constituye un capítulo abierto. Además de surfactante, se secretan a los espacios alveolares una serie de proteínas y péptidos con actividad antibiótica. Algunos de esos péptidos (defensinas y catelicidinas) son análogos a los péptidos microbicidas que secreta la piel de numerosos anfibios, cuya función consiste en establecer una barrera defensiva primaria frente a los patógenos. Por si eso fuera poco, se ha demostrado que las proteínas hidrofóbicas del surfactante (SP-B y SP-C) poseen también actividad antibiótica.

Una cuestión a debatir es si el surfactante ha evolucionado en el epitelio del pulmón de los vertebrados a partir de sistemas de defensa epitelial que han adquirido capacidades tensioactivas o si las actividades de defensa se han ensamblado aprovechando las propiedades de un material que tiene una gran capacidad para extenderse en la interfase aire-líquido (la primera línea de ataque de los organismos patógenos). Cualquiera que sea la tesis correcta, parece claro que ambas actividades del surfactante, la función tensioactiva y la función defensiva, han evolucionado de forma conjunta y quizá no presenten ya elementos independientes.

Bibliografía complementaria

FUNCTION OF SURFACTANT PROTEINS B AND C. T. E. Weaver y J. J. Conkright en *Annual Reviews of Physiology*, vol. 63, págs. 555-578; 2001.

PULMONARY SURFACTANT: THE KEY TO THE EVOLUTION OF AIR BREATHING. C. B. Daniels y S. Orgeig en *News Physiological Sciences*, vol. 39, págs. 151-157; 2003.

INMUNOREGULATORY FUNCTIONS OF SURFACTANT PROTEINS. J. R. Wright en *Nature Reviews in Immunology*, vol. 50, págs. 58-68; 2005.

STRUCTURE OF PULMONARY SURFACTANT MEMBRANES AND FILMS: THE ROLE OF PROTEINS AND LIPID-PROTEIN INTERACTIONS. J. Pérez-Gil en *Biochimica et Biophysica Acta*, vol. 1778, págs. 1676-1695; 2008.

El mecanismo de *Anticitera*

Nuevas investigaciones han descubierto cómo modelizaba los movimientos lunares y pronosticaba eclipses, entre otras maravillas

Tony Freeth

CONCEPTOS BASICOS

- El mecanismo de Anticitera corresponde a una calculadora mecánica, muy singular, de la Grecia del siglo II a.C. Fue descubierto en 1901. Nadie pudo prever que fuera tan grande su potencia de cálculo.
- Por fin, gracias a medios muy modernos de obtención de imágenes, se ha podido reconstruir el funcionamiento de este aparato, que era capaz de pronosticar los eclipses, lunares y solares, y el curso aparente de la Luna por el firmamento.
- Las inscripciones del mecanismo llevan a pensar que pudo haber sido construido en la colonia griega de Siracusa, en Sicilia, tal vez dentro de una tradición técnica nacida con Arquímedes.

De no haber sido por dos tormentas ocurridas en una misma zona del Mediterráneo, pero separadas 2000 años en el tiempo, se hubiera podido perder para siempre la pieza técnica más importante del mundo antiguo.

La primera tormenta, acontecida a mediados del siglo I a.C., provocó el naufragio de un navío mercante romano cargado de tesoros griegos. La segunda, en 1900 de nuestra era, obligó a un grupo de buceadores de esponjas a buscar refugio en Anticitera, una isla diminuta entre Creta y la Grecia continental. Cuando amainó, probaron a buscar esponjas allí, y acertaron por casualidad con el pecio. Regresaron meses después, con apoyo del gobierno griego. A lo largo de nueve meses fueron recuperando un cúmulo de hermosos objetos griegos: raras estatuas en bronce, cristalerías fascinantes, ánforas, cerámicas y joyas. Fue una de las primeras excavaciones arqueológicas submarinas de gran alcance.

Al principio, apenas se prestó atención a una de las piezas: una masa amorfa y muy calcificada, del tamaño de la guía de teléfonos. Varios meses después se quebró; aparecieron entonces los restos de ruedas dentadas de bronce, muy corroídas —todas densamente encajadas y con dientes de apenas un milímetro y medio—, así como unas placas cubiertas con escalas científicas e inscripciones en griego. El descubrimiento provocó gran conmoción, pues hasta entonces se pensaba que los antiguos solamente habían construido engranajes para tareas mecánicas de fuerza bruta.

En la actualidad se exhiben en el Museo Arqueológico Nacional de Atenas tres de los principales fragmentos del mecanismo de Anticitera, como se ha dado en llamar al artefacto. Rodeados como están por imponentes estatuas de bronce y otras glorias artísticas de la antigua Grecia, sus restos ofrecen un aspecto humilde y frágil. Pero la sutil potencia contenida en ellos es mucho más asombrosa de lo que se podría haber imaginado en un principio.

Supe de este mecanismo en 2000. Yo me dedicaba al cine. Mike Edmunds, astrónomo de la Universidad de Cardiff, en Gales, se puso en contacto conmigo porque le parecía que proporcionaba un tema magnífico para un documental de televisión. Me enteré de que, tras muchos años de estudio, se habían logrado progresos considerables en el conocimiento del artefacto. Sugerían que debió de servir para cálculos astronómicos; sin embargo, su funcionamiento todavía no se había logrado esclarecer del todo. Dada mi formación mate-



mática, sentí un intenso deseo de comprender el mecanismo.

Edmunds y yo reunimos un grupo internacional de colaboradores, al que finalmente se sumaron historiadores, astrónomos y dos equipos de expertos en tratamiento de imágenes. A lo largo de estos últimos años, nuestro grupo ha reconstruido el modo de funcionamiento de casi todas las partes que se han conservado, cuyas funciones se han averiguado. El dispositivo permitía calcular las fechas de los eclipses, lunares o solares, modelizar el movimiento aparente de la Luna por el firmamento con la máxima precisión que permitían los conocimientos disponibles, y llevar la cuenta de fechas de importancia social, por ejemplo, los Juegos Olímpicos.

No se tiene noticia de que en ningún lugar del mundo, y durante los mil años siguientes como mínimo, haya existido algún instrumento de parejo refinamiento. De no haber sobrevivido este espécimen, su existencia en aquellos tiempos se hubiera juzgado imposible.

Primeros investigadores

El filólogo alemán Albert Rehm fue el primero en comprender, hacia 1905, que el mecanismo de Anticitera era una calculadora astronómica. Medio siglo después, Derek J. de Solla Price, un historiador de la ciencia por entonces en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, describía el aparato en un artículo de *Scientific American*; por esa fecha sólo se había podido revelar un pequeño número de sus secretos.

El dispositivo, proponía Price, se accionaba mediante una manivela lateral y mostraba los resultados haciendo que girasen unas agujas sobre unos diales, tanto en el anverso como en el reverso del aparato. El calculista podía, accionando la manivela, definir en la máquina una fecha cualquiera, indicada en un calendario circular de 365 días de su cara frontal. (Haciendo girar el dial se podía introducir un día cada cuatro años, como se hace ahora en los años bisiestos.) Al mismo tiempo, la manivela accionaba todos los demás engranajes del mecanismo para que proporcionasen la información correspondiente a la fecha establecida.

Un segundo dial frontal, concéntrico con el calendario, estaba grabado con 360 grados y 12 signos representativos de las constelaciones del zodíaco (*véase el recuadro* "Relojería astronómica"), que son las constelaciones que el Sol va recorriendo en su movimiento aparente con respecto a las "estrellas fijas" ("movimiento" debido, en realidad, al giro de la Tierra alrededor del Sol); esa trayecto-

LOS GRIEGOS DE LA ANTIGÜEDAD CLASICA sabían calcular las periodicidades de los eclipses solares gracias a las observaciones efectuadas durante siglos por los babilonios. El mecanismo de Anticitera debía de hacer esos cálculos, bien para los propios griegos, bien para romanos acaudalados que pudieran permitírselo. La descripción presentada se basa en una reconstrucción teórica efectuada por el autor y sus colaboradores.

JEAN-FRANCOIS PODEVIN Y TONY FREETH



Los mundos griego y romano, hacia 145 a.C.

¿De dónde procedía?

El mecanismo de Anticitera fue construido hacia mediados del siglo II a.C., justamente cuando Roma se expandía a costa de los reinos helenísticos (*en verde*). Unos buceadores hallaron sus restos corroídos (*entre ellos, el fragmento de la izquierda*) en 1901, en un navío naufragado cerca de la isla de Anticitera. Debió de hundirse hacia 65 a.C. cuando portaba tesoros artísticos griegos, posiblemente de Pérgamo a Roma. Aunque Rodas contaba con una de las más importantes escuelas de astronomía griega, datos recientes inducen a pensar en un origen corintio. No es descabellado que se construyera en Siracusa, antigua colonia corintia en Sicilia. Arquímedes, el gran científico e inventor, vivió allí, y pudo haber dejado tras de sí una escuela técnica de gran perfección.

ria es la "eclíptica". Price conjeturaba que el anverso del mecanismo contaba, seguramente, con un puntero indicador de dónde se encontraría el Sol sobre la eclíptica para la fecha solicitada.

Price logró identificar, entre los fragmentos supervivientes, los restos de una docena de ruedas dentadas que habían formado parte de las entrañas del mecanismo. Y efectuó una estimación aproximada del número de sus dientes, que era lo más que se podía hacer, pues casi todas las ruedas estaban dañadas e incompletas. Posteriormente, en un estudio de 1974 que hizo época, Price describió 27 ruedas en el fragmento principal y mejoró los recuentos de sus dientes basándose en radiografías del instrumento —las primeras— realizadas por el radiólogo griego Charalambos Karakalos.

Los recuentos de los dientes han permitido averiguar para qué cálculos servía el mecanismo. Por ejemplo, hacer girar la manivela hasta que una rueda primaria de 64 dientes diese una vuelta completa equivalía al paso de un año, según señalaba un puntero en la esfera del calendario. Esa rueda primaria estaba engranada a dos secundarias de 38 dientes, que giraban, pues, 64/38 vueltas por cada año. Este movimiento se iba transmitiendo de forma similar por todo el mecanismo; en cada etapa, la razón de los números de dientes define una fracción diferente. El movimiento era finalmente transmitido a los punteros, que en consecuencia describían giros según las relaciones correspondientes a diferentes ciclos astronómicos. Price descubrió que las razones de uno de esos trenes de engranajes materializaban el ciclo lunar de los antiguos babilonios.

Price, al igual que Rehm, sugirió que el mecanismo contendría también engranajes epicíclicos, ruedas planetarias que giran sobre rodamientos montados a su vez sobre otras ruedas, como las tazas giratorias de los parques de atracciones. Estos sistemas amplían la gama de operaciones factibles mediante engranajes, pues con su ayuda se pueden calcular no sólo multiplicaciones o divisiones, sino también sumas y restas. No se tiene noticia de que hayan existido en la técnica occidental otros sistemas de engranajes epicíclicos durante, por lo menos, los 1500 años siguientes.

Varios otros investigadores han estudiado el mecanismo, singularmente Michael Wright, conservador del Museo de Ciencias londinense, en colaboración con Allan Bromley, informático de la Universidad de Sydney. Fueron ellos quienes obtuvieron las primeras radiografías "tridimensionales" del mecanismo; hicieron ver que el modelo de Price tenía que ser erróneo. Bromley falleció en 2002, pero Wright ha continuado el trabajo, consiguiendo progresos de importancia. Ha descubierto, por ejemplo, pruebas de que los diales traseros, que en un principio se creían formados por anillos concéntricos, son en realidad espirales, y que existía en la parte frontal un mecanismo epicíclico que calculaba las fases de la Luna.

KIRK CALDWELL (*mapa*); MUSEO NACIONAL DE ARQUEOLOGIA, ATENAS (*fragmento*)

Wright adoptó también una de las hipótesis de Price, a saber, que el dial superior del reverso pudiera ser un calendario lunar basado en el ciclo de 19 años —o 235 meses lunares— conocido como ciclo metónico, por serle atribuido a Metón de Atenas, astrónomo del siglo v a.C., aunque había sido descubierto ya por los babilonios. Todavía se determina con él la festividad judía de Rosh Hashaná y la Pascua cristiana. Descubrimos posteriormente que este puntero era extensible; así, una espiga de su extremo podía recorrer un surco que definía las vueltas de la espiral.

Blade Runner en Atenas

Cuando nuestro grupo quiso empezar a trabajar se encontró con una desesperante carencia de datos. No teníamos acceso a estudios radiográficos anteriores; ni siquiera disponíamos de una buena colección de fotografías. Pero dos imágenes de una revista científica —una radiografía de una carpa dorada y una ampliación de una tableta babilónica de arcilla— me sugirieron nuevas formas de obtener datos de calidad.

Le pedimos a Hewlett-Packard, en California, que obtuviera imágenes fotográficas de la máxima calidad con las técnicas más punteras, y encargamos a X-Tek Systems, del Reino Unido, que hiciera radiografías tridimensionales. Al cabo de cuatro años de delicadas gestiones diplomáticas, John Seiradakis, de la Universidad Aristóteles de Tesalónica, y Xenophon Moussas, de la Universidad de Atenas, obtuvieron los permisos necesarios y se pudo organizar el traslado a Atenas del instrumental para la toma de imágenes, pues el mecanismo de Anticitera es demasiado frágil para viajar.

Recibimos en el ínterin una llamada inesperada de Maria Zafeiropoulou, del museo. Mary había bajado a los sótanos y encontrado cajas de fragmentos rotulados “Anticitera”. ¿Podrían ser de nuestro interés? ¡Pues claro que sí! Contábamos ahora con un total de 82 piezas, frente a la veintena disponible hasta entonces.

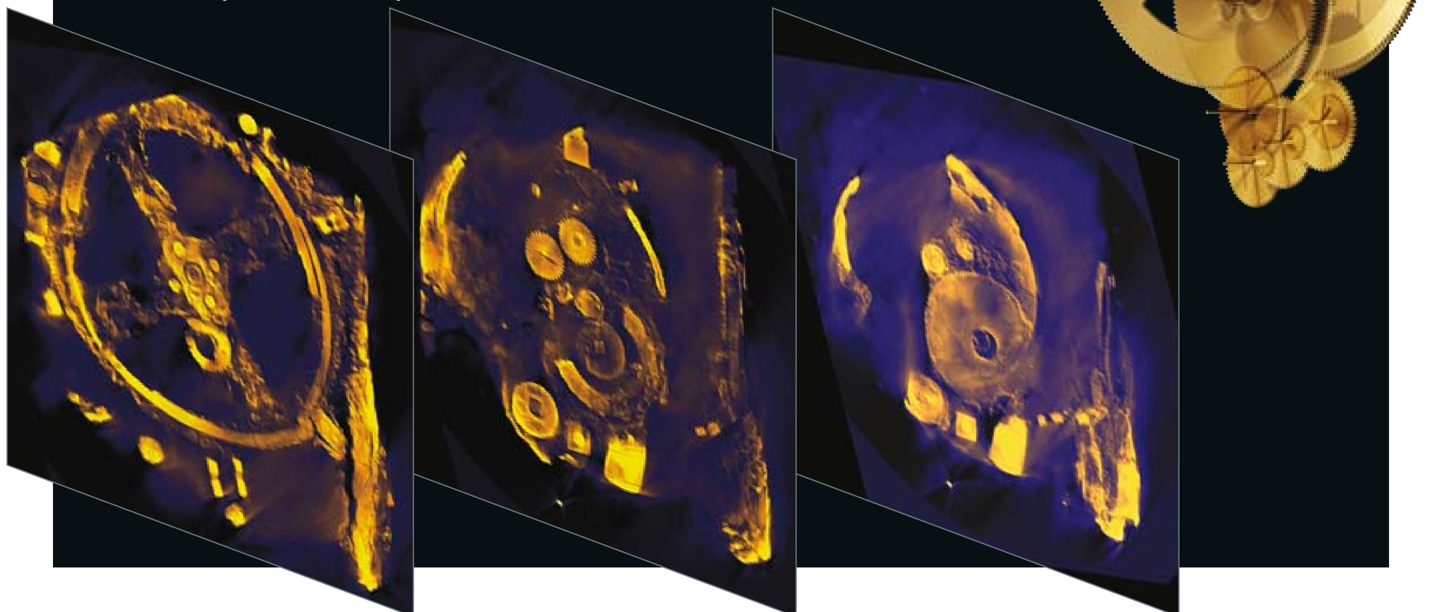
El equipo de HP, dirigido por Tom Malzbender, ensambló una misteriosa cúpula de metro y medio de diámetro, revestida por toda clase de focos y flashes electrónicos que proporcionaban iluminación desde muchos ángulos. El equipo fotográfico se valió de una técnica importada de los juegos de ordenador, la llamada “aplicación polinómica de texturas”, que permite amplificar los detalles superficiales. Ahora resultaban claramente legibles ciertas inscripciones que Price había encontrado indescifrables; los detalles finos podían ser ampliados en la pantalla del ordenador controlando la reflectancia de la superficie y el ángulo de iluminación. Las inscripciones constituyen en esencia un manual de instrucciones grabado sobre las placas exteriores.

Un mes más tarde, la policía municipal hacía despejar las calles del centro de Atenas

Los historiadores no hubieran considerado posible la existencia en aquel tiempo de un **artefacto tan complejo.**

Anatomía de una reliquia

La tomografía computarizada, o TC, proporciona una representación tridimensional a partir de numerosas radiografías. Gracias a esta técnica, el autor y sus colegas dispusieron de vistas del interior de los restos del mecanismo de Anticitera. Se puede usar un escáner TC para, por ejemplo, ver secciones finas de un objeto (*abajo, secciones de un fragmento principal*). Esta información permitió que el equipo comprendiera cómo se engranaban las ruedas supervivientes y estimar el número de sus dientes, lo que permitió a su vez averiguar qué cálculos efectuaban. El equipo pudo entonces reconstruir casi todo el mecanismo (*véase el modelo de la derecha y el recuadro* “Relojería astronómica”).



para que el camión que transportaba las ocho toneladas del aparato de rayos X de X-Tek, al que llaman "Blade Runner", pudiera acceder al museo. Blade Runner efectúa tomografías computarizadas similares a las de un TAC hospitalario, pero su resolución y penetración es mucho mayor. Roger Hadland y su grupo de X-Tek lo habían modificado *ad hoc*, para que los rayos X poseyeran energía suficiente y penetrasen en los fragmentos del mecanismo de Anticitera. La reconstrucción tridimensional que obtuvieron resultó maravillosa: Price sólo podía ver un rompecabezas de ruedas dentadas, superpuestas unas a otras, pero a nosotros nos era posible examinarlas por capas dentro del fragmento y observar detalles finos de los dientes de los engranajes.

Los rayos X revelaron inscripciones que nadie había visto en más de 2000 años.

De manera inesperada, los rayos X revelaron más de 2000 nuevos caracteres de texto que habían permanecido ocultos en los fragmentos. En la actualidad se han identificado e interpretado un total de unos 3000 de los 15.000 caracteres que probablemente había. Moussas y Yanis Bitsakis, ambos de la Universidad de Atenas, y Agamemnon Tselikas, del Centro de Historia y Paleografía, han empezado a descubrir inscripciones que han permanecido ocultas a los ojos de los humanos durante más de 2000 años. Uno de los fragmentos se traduce como "...subdivisiones en espiral 235...", lo que confirma que el dial superior trasero era una espiral descriptiva del calendario metónico.

Sistema babilónico

De vuelta en Londres, comencé a examinar los escáneres obtenidos por TC. Estaba claro que ciertos fragmentos pertenecían a un dial espiral del reverso. Una estimación del número total de divisiones de las cuatro vueltas completas de que contaba esa espiral indicaba que debieron de ser entre 220 y 225. El candidato favorito era un número primo: 223. Los antiguos babilonios habían descubierto que, si se observa un eclipse lunar —lo que solamente puede ocurrir en luna llena—, ordinariamente tendrá lugar un eclipse del mismo tipo al cabo de 223 meses lunares. Análogamente, si observaban un eclipse de Sol —que solamente puede producirse en luna nueva—, podían pronosticar que transcurridas otras 223 lunas nuevas se produciría un nuevo eclipse de Sol (pero no siempre les era posible observarlo: los eclipses de Sol sólo son visibles desde determinados lugares de la Tierra, y los astrónomos de la Antigüedad carecían de medios para predecirlos con certeza). Los eclipses se repiten con semejante regularidad porque, cada 223 meses lunares el Sol, la Tierra y la Luna vuelven

Relojería astronómica



GRIFF WASON Y TONY FREETH

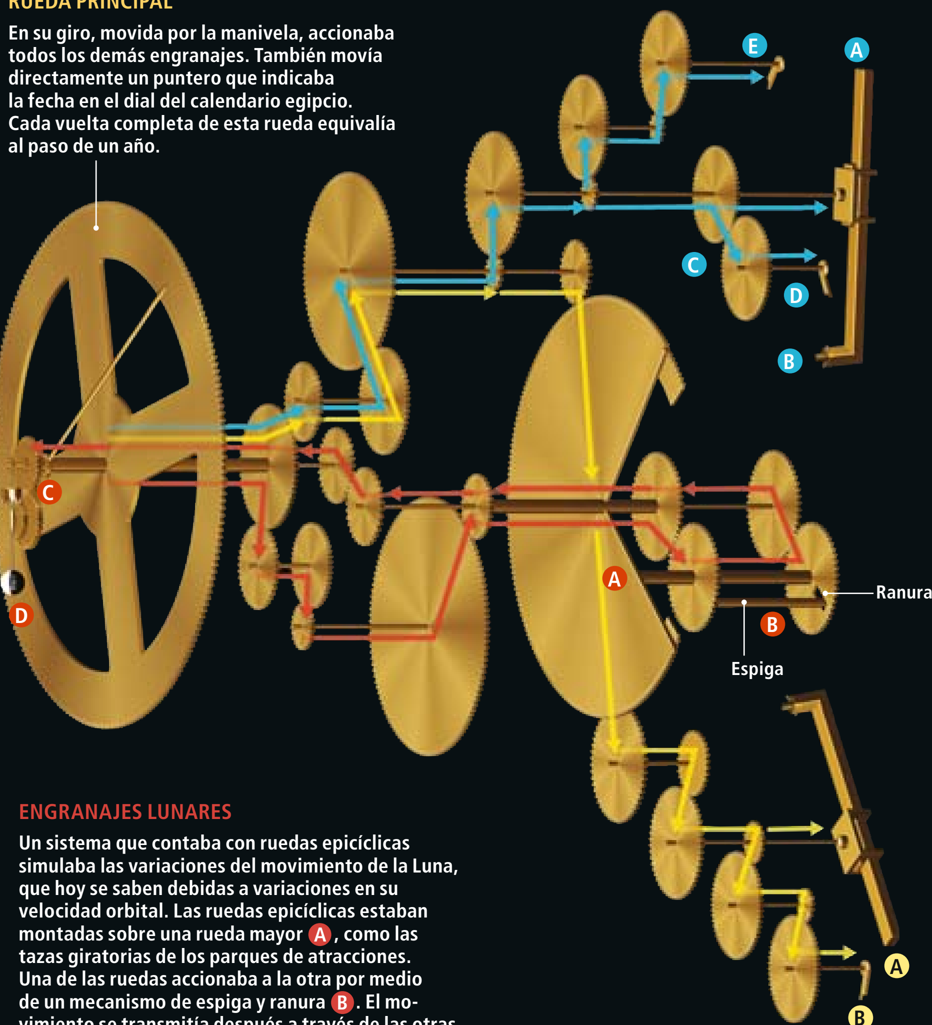
En esta representación del mecanismo desmontado se ven las 30 ruedas dentadas conocidas, excepto una, más algunas otras cuya existencia se presume. El giro de una manivela situada en un costado ponía en acción todos los engranajes del mecanismo y movía unos punteros en los diales delanteros y traseros. Las flechas de color azul, rojo y amarillo explican cómo se transmitía el movimiento de unas ruedas a otras. El usuario podía elegir una fecha en el dial del calendario egipcio, de 365 días, situado en el panel frontal, o bien en el calendario metónico, de 235 meses lunares, en el panel trasero, y leer después las predicciones astronómicas correspondientes a la fecha, como las posiciones o las fases de la Luna, en los otros diales. También era posible girar la manivela para fijar un cierto fenómeno en un dial astronómico y ver después en qué fecha se produciría. Otros engranajes, hoy perdidos, pudieron servir para calcular las posiciones del Sol o de algunos de los cinco planetas conocidos en la Antigüedad, que se mostrarían mediante punteros en el dial del zodíaco.

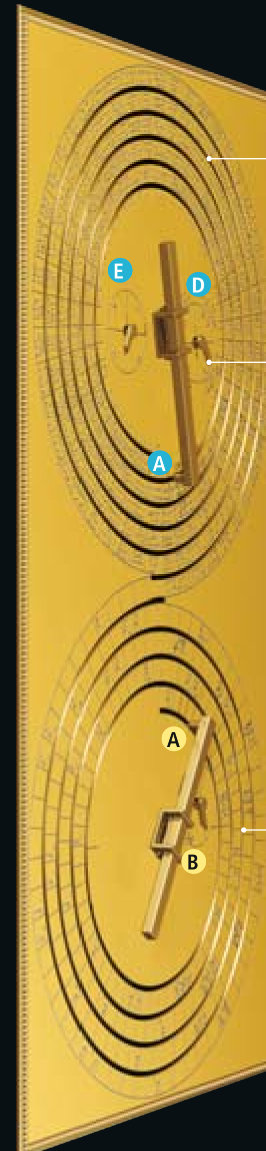
TREN DE ENGRANAJES METONICO

Calculaba el mes en el calendario metónico, de 235 meses lunares, y lo presentaba mediante un puntero (A) del dial del calendario metónico, en el panel trasero. En la extremidad del puntero, una espiga (B) iba siguiendo el surco espiral; el puntero se alargaba hacia el exterior al ir recorriendo los meses marcados en las sucesivas vueltas. Unos piñones auxiliares (C) hacían girar un puntero (D) sobre un dial menor, que indicaba los ciclos cuatrienales de los Juegos Olímpicos y de otros certámenes deportivos. Otras ruedas movían un indicador sobre un dial menor, (E), que quizá indicara un ciclo de 76 años.

RUEDA PRINCIPAL

En su giro, movida por la manivela, accionaba todos los demás engranajes. También movía directamente un puntero que indicaba la fecha en el dial del calendario egipcio. Cada vuelta completa de esta rueda equivalía al paso de un año.





DIAL DEL CALENDARIO METONICO

Señalaba el mes en un ciclo de 235 meses lunares, dispuestos sucesivamente en espiral.

DIAL DE LAS OLIMPIADAS

Indicaba los años de los antiguos Juegos Olímpicos y de otros eventos.

DIAL DEL ECLIPSE LUNAR SAROS

Las inscripciones sobre la espiral indicaban los meses con eclipse lunar y solar.

ENGRANAJES LUNARES

Un sistema que contaba con ruedas epicíclicas simulaba las variaciones del movimiento de la Luna, que hoy se saben debidas a variaciones en su velocidad orbital. Las ruedas epicíclicas estaban montadas sobre una rueda mayor (A), como las tazas giratorias de los parques de atracciones. Una de las ruedas accionaba a la otra por medio de un mecanismo de espiga y ranura (B). El movimiento se transmitía después a través de las otras ruedas hasta el frontal del mecanismo. Allí, otro sistema epicíclico (C) se encargaba de la rotación de una esfera mitad blanca, mitad negra (D), que mostraba las fases lunares. Un puntero (E) exponía la posición de la Luna sobre el dial del zodíaco.

TREN DE ENGRANAJES DE LOS ECLIPSES

Calculaba el mes en el ciclo de Saros, los 223 meses lunares que median entre eclipses sucesivos. Mostraba el mes sobre el dial de Saros mediante un puntero extensible (A), parecido al del dial metónico. Unos piñones auxiliares desplazaban un puntero (B) sobre un dial más pequeño. Ese puntero describía la tercera parte de un giro completo por cada ciclo de 223 meses, para indicar que el momento del eclipse correspondiente tendría un retraso de 8 horas.

aproximadamente a una misma alineación mutua, periodicidad que es conocida como ciclo de Saros.

Entre las divisiones de la escala aparecían bloques de símbolos, conteniendo casi todos la letra Σ o H, o ambas. Pronto comprendí que Σ denotaba Σεληνη (*Selene*), nombre griego de la Luna, lo que indicaba un eclipse lunar; mientras que H significaba Ηλιοσ (*Helios*), es decir, Sol, indicación de un eclipse solar. Los babilonios sabían también que, dentro del período de 223 meses, los eclipses acontecían en ciertos meses, dispuestos según una pauta predictible y separados por lapsos de cinco o seis meses; la distribución de los símbolos en torno al dial casaba exactamente con dicho patrón.

Me era necesario, pues, seguir tales indicios y penetrar en el corazón del mecanismo para descubrir adónde me llevaría el nuevo hallazgo. Había que empezar por descubrir una rueda de 223 dientes que gobernase ese nuevo dial de Saros. Karakalos había estimado que una gran rueda visible en la parte posterior del fragmento principal tenía 222 dientes. Pero Wright había revisado la estimación y dado la cifra 223, cosa que Edmunds confirmó. Disponiendo de recuentos verosímiles para los dientes de otros engranajes, y con la adición de una rueda menor, y por el momento hipotética, la rueda de 223 dientes podría efectuar el cálculo requerido.

Pero seguíamos sin solventar un gran problema en el mecanismo, que iba a resultar la parte más difícil. Además de calcular los ciclos de Saros, la gran rueda de 223 dientes era portadora también del sistema epicíclico señalado por Price: un emparedado de dos pequeñas ruedas asociadas a la mayor, a la manera de las tazas del parque de atracciones. Cada rueda epicíclica se engranaba también con otra pequeña. La situación era un tanto paradójica: esas cuatro ruedas pequeñas parecían contar todas con 50 dientes, algo aparentemente absurdo, pues la salida sería entonces la misma que la entrada.

Al cabo de meses de frustración, recordé que Wright había observado que una de las dos ruedas epicíclicas tiene en su superficie una espiga que encaja en una ranura de la otra. La idea clave de Wright era que las dos ruedas giraban en torno a ejes ligeramente diferentes, separados un milímetro. En consecuencia, el ángulo girado por una de las ruedas era alternativamente un poco mayor o un poco menor que el ángulo girado por la otra. Así pues, si una de ellas giraba con velocidad angular constante, la velocidad de la otra variaría, oscilando de un poco mayor a un poco menor.

Predicción de eclipses

El manejo del mecanismo de Anticitera sólo exigía un poco de práctica y algún conocimiento astronómico. Tras una calibración inicial, efectuada por un experto, el mecanismo podía facilitar con buena precisión pronósticos sobre fenómenos que ya habían ocurrido decenas de años atrás o que ocurrirían dentro de unas docenas de años. Las inscripciones del dial de Saros, separadas por intervalos de cinco o seis meses, correspondían a los meses en que la Tierra, el Sol y la Luna se hallaban casi alineados (y podía, pues, haber un eclipse lunar o solar) en un ciclo de 223 meses lunares. Una vez conocido el mes de un eclipse, se podía calcular el día exacto en la parte delantera, sabiendo que los eclipses solares sólo se producen en luna nueva, y los lunares, solamente en luna llena.

Pedir la Luna

Aunque Wright acabó rechazando su propia observación, me percaté de que la velocidad variable de rotación era precisamente lo que hacía falta para calcular los movimientos de la Luna, de conformidad con la teoría astronómica más avanzada del siglo II a.C., atribuida a Hiparco de Rodas. Nadie, hasta Kepler (1605 d.C.), supo que las órbitas eran elípticas y que la Luna experimentaba una aceleración al dirigirse hacia el perigeo (el punto de su órbita más próximo a la Tierra) y una deceleración hacia el apogeo (el punto opuesto). No obstante, los antiguos sí sabían que el movimiento de la Luna contra el zodíaco parecía frenarse y acelerarse periódicamente.

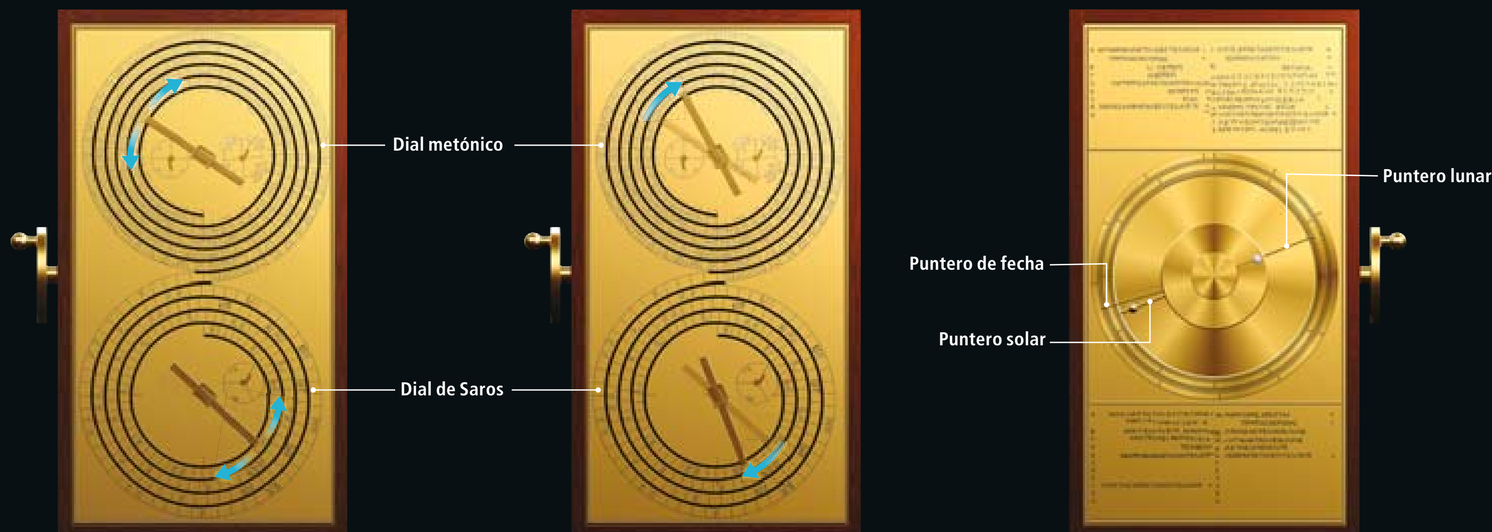
En el modelo ideado por Hiparco, la Luna recorría una trayectoria circular a velocidad constante, pero el centro de ese círculo no permanecía fijo, sino que recorría a su vez una circunferencia mucho menor, también a velocidad constante. Se obtenía así una aproximación francamente buena del movimiento aparente de la Luna. Estos círculos montados sobre otros círculos se llamaban epiciclos, y presidieron el pensamiento astronómico hasta el siglo XVII.

Existía una complicación adicional: el apogeo y el perigeo no son puntos fijos, porque la elipse de la órbita lunar describe una rotación completa cada nueve años, aproximadamente. El tiempo que tarda la Luna en retornar al perigeo es, pues, algo mayor del que tarda en regresar a un mismo punto del zodíaco. La diferencia es sólo de 0,112579655 vueltas por año. Si el piñón de entrada tuviera 27 dientes, la rotación de la rueda principal resultaría ligeramente excesiva; con 26 dientes, algo menor de lo requerido. Parecía que el número adecuado caía en medio.



INSCRIPCIONES

Este fragmento del dorso del mecanismo de Anticitera, que vemos en radiografía, contiene las palabras "subdivisiones en espiral 235", que contribuyó a confirmar que el dial superior de la parte trasera mostraba los 235 meses del calendario metónico dispuestos en espiral. Anteriormente, sólo se había podido ver la palabra ΕΛΙΚΙ (*en el ángulo superior izquierdo*), que en griego significa "espiral".



INSERCION DE LA FECHA
Se empieza girando la manecilla para ajustar el mes y el año en curso en el calendario metónico. El puntero inferior girará hasta el mes correspondiente en el dial de Saros (*de eclipses*).

CALCULO DEL MES
Se gira la manivela para hacer avanzar el tiempo hasta que el puntero del dial de Saros señale una inscripción de eclipse. La inscripción indicará el mes y la hora del día (no el día) de un eclipse y, también, si será solar o lunar.

CALCULO DEL DIA
Se hace girar la manivela hasta que los punteros lunar y solar queden superpuestos (*para un eclipse solar*) o en oposición (*eclipse lunar*). El puntero del calendario egipcio se desplazará en consecuencia e indicará el día del eclipse.

Así que ensayé la idea de una rueda imposible, de 26 ½ dientes. Unas cuantas pulsaciones en la calculadora y resultó 0,112579655, exactamente el valor correcto. ¡Una concordancia de 9 cifras decimales no podía ser una coincidencia! Pero las ruedas dentadas no pueden tener un número fraccionario de dientes. Me di cuenta entonces de que 26 1/2 × 2 = 53. De hecho, Wright había estimado que una de las ruedas más importantes tenía 53 dientes, y ahora veía que ese valor hacía que todo funcionase. El proyectista de la máquina había montado la espiga y la ranura en forma epicíclica para retrasar sutilmente el período de su variación, al tiempo que mantenía invariable la rotación fundamental: una idea sencillamente genial.

Gracias a Edmunds nos dimos cuenta también de que el sistema de piñones epicíclicos, que se encuentra en la parte trasera del mecanismo, movía un eje que giraba dentro de otro eje hueco a través del resto del mecanismo, hasta la parte frontal, de modo que el movimiento lunar pudiera representarse sobre el dial del zodíaco y sobre el exhibidor de las fases lunares. Todas las cuentas de dientes quedaban así explicadas, con la excepción de una pequeña rueda que sigue siendo hoy un misterio.

Investigaciones posteriores nos han llevado a efectuar algunas modificaciones en nuestro modelo. Una afectaba a un pequeño dial subsidiario, instalado en el reverso, dentro del dial metónico, y que está dividido en cuatro cuadrantes. Me dio la primera pista la palabra "*NEMEA*", escrita debajo de uno de los cuadrantes. Alexander Jones, historiador que enseña en la Universidad de Nueva York, me explicó que se refiere a los juegos de Nemea, uno de los principales encuentros atléticos de la antigua Grecia.

Por último, encontramos, grabadas alrededor de los cuatro cuadrantes del dial, fragmentos de las palabras "*ISTHMIA*", correspondiente a los juegos de Corinto, "*PYTHIA*", por los juegos de Delfos, "*NAA*", por unos juegos menos importantes en Dodona, y "*OLYMPIA*", para los más importantes del mundo griego, los Juegos Olímpicos. Todos estos juegos se celebraban cada dos o cada cuatro años. Anteriormente habíamos considerado que el mecanismo constituía estrictamente un instrumento para cálculos astronómicos, pero el dial olímpico —como dimos en llamarlo— le confería una función social del todo inesperada.

De las 30 ruedas dentadas que han sobrevivido, 29 sirven para calcular ciclos del Sol y de la Luna. Pero nuestros estudios de las inscripciones en el frontal del instrumento han proporcionado una auténtica mina de información sobre el orto y el ocaso de estrellas importantes y de planetas. Además, sobre la rueda dentada "primaria" del frontal del mecanismo quedan restos de rodamientos que dan testimonio de la pérdida de un sistema epicíclico que muy posiblemente modelizaba los vaivenes de los planetas a lo largo de la eclíptica (así como las anomalías en el movimiento propio del Sol). Todos estos indicios otorgan fuerte respaldo a la inclusión del Sol y de al menos algunos de los cinco planetas conocidos en tiempos antiguos: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno.

Wright construyó un modelo del mecanismo al que dotó de sistemas epicíclicos correspondientes a los cinco planetas. Pero su ingeniosa disposición no concuerda totalmen-

GRIFF WASON Y TONY FREETH

El autor

Tony Freeth estudió matemáticas y se doctoró en lógica matemática. Su carrera como cineasta culminó en una serie de documentales sobre el aumento de la producción agrícola en el Africa subsahariana, cuyo narrador era Norman Borlaug, premio Nobel. Freeth volvió a ocuparse de problemas académicos en 2000, con su investigación sobre el mecanismo de Anticitera. Es director general de la compañía Images First; prepara una película sobre el mecanismo.

te con la información disponible. Es posible, también, que con sus 40 ruedas adicionales resulte demasiado complejo para igualar la brillante simplicidad del resto del mecanismo. Tal vez la respuesta definitiva siga en el lecho marino, a 50 metros de profundidad.

¿Eureka?

Sigue sin saberse de dónde procede el mecanismo y quién fue su creador. Casi todo el cargamento de la nave naufragada procedía del mundo griego oriental, de Pérgamo, Cos, Rodas y otros. Resulta natural conjeturar que el constructor del mecanismo pudiera haber sido Hiparco, o algún otro astrónomo de Rodas. Pero el texto oculto entre las 235 divisiones mensuales de la escala del calendario metónico contradice esa opinión. Algunos de los nombres de los meses se empleaban sólo en determinados lugares del mundo griego clásico y apuntan a un origen corintio. Si el mecanismo fuese de origen corintio, es casi seguro que se construyó antes de que Corinto fuese arrasada por los romanos en 146 a.C. Tal vez resulte más verosímil la hipótesis de que fue construido para alguna de las colonias corintias del noroeste de Grecia o de Sicilia.

Sicilia constituye una sólida posibilidad. La ciudad de Siracusa, en esa isla, fue la morada de Arquímedes, el más grande de los científicos de la Antigüedad. En el siglo I a.C., Cicerón refiere que Arquímedes fue muerto en 212 tras el asedio de Siracusa, y que el general romano victorioso, Marcelo, se llevó consigo, como botín, una única pieza: un instrumento astronómico construido por Arquímedes. ¿Cabría en lo posible que fuese el mecanismo de Anticitera? Creemos que no, pues parece haber sido construido decenios después de la muerte de Arquímedes. Pero sí pudiera haber sido fruto de una tradición de construcción de instrumentos que tuvo su origen en el hombre que exclamó ¡eureka!

Son muchas las cuestiones concernientes al mecanismo de Anticitera que siguen sin respuesta. Tal vez la más importante sea por qué esta poderosa técnica parece haber sido tan poco aprovechada, ni en su propio tiempo ni en tiempos posteriores.

Price escribía en *Scientific American*:

"Asusta un poco saber cuánto, justamente antes de la caída de su gran civilización, se habían aproximado los antiguos griegos a nuestra era, no sólo en el pensamiento, sino también en su tecnología científica."

Nuestros descubrimientos han demostrado que el mecanismo de Anticitera se aproximaba a nuestro mundo más todavía de lo que Price había imaginado.

Bibliografía complementaria

AN ANCIENT GREEK COMPUTER. Derek J. de Solla Price en *Scientific American*, vol. 200, n.º 6, págs. 60-67; junio, 1959.

GEARS FROM THE GREEKS: THE ANTIKYTHERA MECHANISM — A CALENDAR COMPUTER FROM CA. 80 B.C. Derek de Solla Price en *Transactions of the American Philosophical Society*, New Series, vol. 64, n.º 7, págs. 1-70; 1974.

DECODING THE ANCIENT GREEK ASTRONOMICAL CALCULATOR KNOWN AS THE ANTIKYTHERA MECHANISM. Tony Freeth et al. en *Nature*, vol. 444, págs. 587-591; 30 de noviembre, 2006.

CALENDARS WITH OLYMPIAD DISPLAY AND ECLIPSE PREDICTION ON THE ANTIKYTHERA MECHANISM. Tony Freeth, Alexander Jones, John M. Steele y Yanis Bitsakis en *Nature*, vol. 454, págs. 614-617; 31 de julio, 2008.

El telescopio Spitzer

Para conseguir una imagen clara de las emisiones infrarrojas de los cuerpos celestes, hubo que enfriar el Telescopio Espacial Spitzer a temperaturas criogénicas

Michael Werner

En las observaciones astrofísicas, las imágenes que cubren múltiples longitudes de onda proporcionan una información más rica. La banda electromagnética en la que emiten casi todos los cuerpos celestes es el infrarrojo: los objetos en distintos lugares, desde los fríos límites de nuestro sistema solar a los núcleos de galaxias muy lejanas enterrados en polvo, radian casi por completo, o al menos predominantemente, en esa banda. Por tanto, es imprescindible una buena visualización de tales longitudes de onda.

El problema es que la Tierra representa un entorno muy hostil para la exploración infrarroja del espacio, puesto que la atmósfera terrestre emite también en el espectro infrarrojo y, además, absorbe gran parte de la señal entrante. Hasta el calor del telescopio puede degradar su propia claridad.

Desde finales de los años cincuenta del siglo XX, un número de grupos pioneros se enfrentó a esa dificultad y llevó a cabo investigaciones infrarrojas cada vez más interesantes desde observatorios de superficie o montados en globos y en aviones. Un esfuerzo que continúa hoy en día en paralelo a la exploración espacial. La capacidad de observar infrarrojos es un componente integral de los telescopios de superficie actuales y de los proyectados para el futuro, con diámetros de 10 a 30 metros.

Pero la mejor solución estriba en enviar al espacio un telescopio enfriado con helio líquido a temperaturas de unos pocos grados por encima del cero absoluto. La Instalación Telescópica Espacial e Infrarroja (SIRTF son las siglas en inglés) de la NASA, propuesta a principios de los años setenta, se lanzó en agosto de 2003. Se la rebautizó con el nombre de Telescopio Espacial Spitzer en honor a Lyman Spitzer, Jr., primer astrofísico en proponer la idea de colocar un gran telescopio en el espacio. Spitzer fue también el promotor del Telescopio Espacial Hubble.

Resulta, pues, coherente que el Spitzer forme parte de la familia multiespectral de satélites de la NASA con grandes observatorios a bordo, junto al Telescopio Hubble, el Observatorio de Rayos X Chandra y el recientemente lanzado Telescopio Espacial Fermi de rayos gamma.

El Telescopio Espacial Spitzer, de unos 4,5 metros de altura y 2 metros de diámetro, pesaba 861 kilogramos en el lanzamiento. Está en órbita alrededor del Sol, lo que permite que los paneles solares siempre apunten hacia la fuente de energía, al mismo tiempo que protegen del calor solar al satélite. Bajo los paneles solares, un sistema pasivo de enfriamiento radiativo, formado por capas reflectivas y emisoras y unos escudos, hace que la capa exterior del telescopio se enfríe a unos 34 kelvin. A bordo, el vapor de helio cumple el resto del trabajo enfriando toda la estructura hasta los 5 kelvin o menos, un poco por encima del cero absoluto.

El Spitzer no es el primer observatorio espacial enfriado criogénicamente. Sucede a dos exitosos pioneros predecesores: el Satélite Astronómico Infrarrojo (IRAS son las siglas en inglés), que duró 10 meses en 1983, y el Observatorio Espacial Infrarrojo (ISO), que operó de 1995 a 1998. Se distingue de ellos en que utiliza una nueva generación de detectores infrarrojos constituidos por un gran número

CONCEPTOS BASICOS

- El Telescopio Espacial Spitzer es un observatorio de la radiación infrarroja emitida por los objetos cósmicos. Estaba enfriado con helio líquido para mejorar la calidad de sus observaciones. Aunque el helio se agotó en 2009, Spitzer seguirá aportando datos útiles durante un tiempo.
- En su "fase fría", Spitzer ha aportado un gran cúmulo de datos sobre los discos protoplanetarios y los exoplanetas, la estructura de la Vía Láctea —confirmó que es una espiral barrada—, las enanas marrones y las galaxias más lejanas.



1. UNA IMAGEN INFRARROJA del telescopio espacial Spitzer descubre cientos de miles de estrellas empaquetadas en el inmenso corazón de la Vía Láctea, a unos 25.000 años-luz de la Tierra. Las estrellas frías y viejas están coloreadas en falso azul, mientras que el polvo de hidrocarburos iluminado por las estrellas calientes y masivas tiene un color rojizo. El punto blanco más brillante en el centro de la imagen denota el mismísimo centro de la galaxia, lugar donde reside un agujero negro supermasivo. No se puede visualizar esta región en imágenes de luz óptica porque el polvo del espacio entre ella y la Tierra bloquea nuestra visión. Los instrumentos infrarrojos del Spitzer han fotografiado un número incontable de estrellas, de incubadoras estelares, de galaxias y muchos otros objetos celestes; han estudiado, asimismo, planetas alrededor de otras estrellas a lo largo de sus seis años de viaje espacial.

de redes de sensores, mientras que las misiones anteriores empleaban detectores individuales o pequeñas redes. La calidad de los detectores del Spitzer y su mayor diámetro le conceden entre 10 y 100 veces más sensibilidad que sus predecesores. Además, los detectores del telescopio Spitzer tienen entre 10 y 100 veces más píxeles que los de cualquier otro telescopio espacial criogénico.

Desde su lanzamiento, el telescopio supone la herramienta más poderosa para la exploración astronómica en longitudes de onda de entre 3,6 y 160 micrómetros, el "infrarrojo entre medio y lejano". El telescopio Spitzer hace uso de un espejo primario de 85 centímetros para dirigir la radiación infrarroja hacia tres instrumentos principales: una cámara infrarroja de longitudes de onda cortas, un fotómetro multibanda para imagen a longitudes de onda largas (que, al igual que la cámara, mide la intensidad y la distribución espacial de la radiación) y un espectrógrafo infrarrojo (capaz de identificar el tipo y la cantidad de compuestos químicos presentes a partir del espectro que emiten).

Un telescopio enfriado reduce el brillo infrarrojo del fondo del cielo unos seis órdenes de magnitud; equivale al factor en que disminuye, en el visible, el brillo del cielo, desde el mediodía de un día soleado hasta la medianoche con luna nueva. Los efectos de semejante reducción del fondo son tan potentes, que Spitzer, a pesar de su espejo relativamente pequeño, es más sensible, para muchas observaciones infrarrojas, que los mayores telescopios de superficie.

Aunque las longitudes de onda del infrarrojo son invisibles al ojo humano y sólo las percibimos como calor, resulta paradójico que sean los objetos demasiado fríos y con poca energía para brillar en el visible los que emiten principalmente en el infrarrojo. Por suerte, las señales infrarrojas pueden percibirse a través del polvo que envuelve los objetos de interés, así las incubadoras estelares y los núcleos de galaxias activas. El Spitzer ha permitido un progreso notable en el estudio de estos objetos; ha logrado también medir la luz directa de los exoplanetas (los planetas que orbitan alrededor de otras estrellas).

La primera fase de la rica vida científica del Spitzer llegó a su fin cuando los últimos miligramos del helio líquido de a bordo se evaporaron en el espacio el 15 de mayo de 2009, varios años después del final de la parte criogénica de la misión que se había previsto en el contrato. La eficiencia del sistema de enfriado de a bordo superó todas las expectativas. Incluso la misión "caliente" del Spitzer resulta prometedora; ahora está limitado por el calor, pero cuenta con capacidad suficiente para continuar la exploración del universo.

CORTESIA DE NASA/JPL-CALTECH/S. STOLOVY (CENTRO CIENTIFICO SPITZER EN CALTECH/*American Scientist*

Con 40.000 horas de observación a sus espaldas, avaladas por más de 1500 publicaciones de equipos científicos de todo el mundo, los logros del Spitzer van más allá de lo que se puede discutir en un único artículo. Apenas unos pocos ejemplos de los resultados más significativos del Spitzer ilustran el amplio rango de la ciencia producida por este telescopio.

El nacimiento de las estrellas y los planetas

En un radio de unos pocos miles de años luz alrededor del Sol, en nuestro rincón de la Vía Láctea, el colapso gravitatorio de densas nubes interestelares forma nuevas estrellas y sistemas planetarios. Gran parte de la formación y evolución temprana de las estrellas sucede a temperaturas y densidades particularmente apropiadas para su estudio en el infrarrojo. El telescopio Spitzer ha demostrado ser un potente instrumento para el análisis de las estructuras a gran escala de los procesos de génesis estelar y el estudio detallado de las incipientes estrellas individuales.

Además, el telescopio Spitzer ha reforzado nuestra idea previa de que las estrellas jóvenes están envueltas en un disco circunestelar que se crea a partir de la conservación del momento angular de la nube en colapso. El material del disco puede evolucionar hacia un sistema planetario; el reciente descubrimiento de planetas alrededor de cientos de estrellas cercanas de tipo solar indica que se trata de un proceso frecuente.

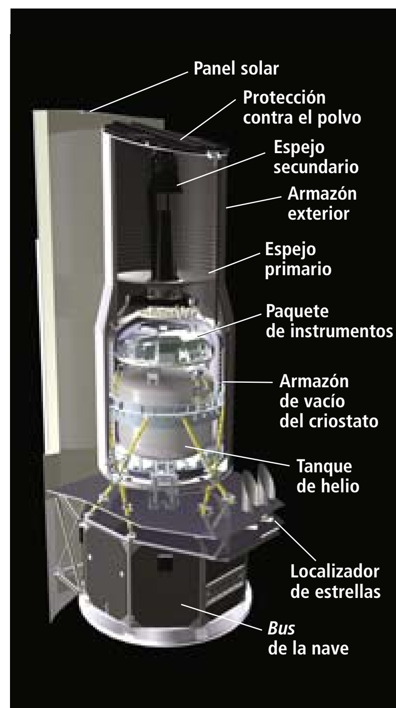
El disco denso de formación planetaria (o protoplanetario) es un objetivo claro de los estudios infrarrojos, puesto que la estrella lo está calentando y radia de nuevo la energía en el infrarrojo. El disco protoplanetario se disipa con la formación de los planetas y la evolución estelar, dejando tras de sí un tenue disco de escombros residuales hechos de partículas de polvo generadas y regeneradas por la evaporación y la colisión de objetos de tipo asteroide o cometa dentro del sistema planetario.

El telescopio Spitzer puede estudiar los discos de escombros —con frecuencia indicadores útiles de la evolución de los sistemas planetarios— alrededor de numerosas estrellas de tipo solar porque su gran extensión hace que estos discos sean más brillantes en el infrarrojo que las propias estrellas.

En el otro extremo del proceso de producción planetaria, el Spitzer ha medido directamente la luz de planetas completamente formados en torno a otras estrellas. Se ha descubierto la mayoría de los exoplanetas analizando los efectos que producen sobre las estrellas que orbitan. Con frecuencia, para ello se ha recurrido a una técnica que explota las pequeñas variaciones de velocidad radial de la estrella, tal y como se las ve desde el telescopio, en respuesta al empuje gravitatorio del planeta. Con apenas una o dos excepciones, la luz del planeta no puede ser separada espacialmente de la luz de su estrella anfitriona; la estrella es demasiado brillante y el planeta está muy cerca de ella.

Los exoplanetas hallados por la técnica de la velocidad radial tienden a ser grandes y a estar próximos a las estrellas, puesto que son los que mayores señales producen. Los exoplanetas de las características mencionadas reciben la denominación de "Jupíteres calientes", ya que tienen una masa parecida a la de nuestro vecino, y los calienta su cercanía a la estrella. El primer exoplaneta así descubierto, 51 Pegasus b, anunciado en 1995, es un planeta de la masa de Júpiter con una órbita que es una fracción de la de Mercurio; esta configuración es tan distinta de la de nuestro sistema solar y diferente de cualquier expectativa, que desencadenó una riada de artículos teóricos y de modelos que aún hoy sigue creciendo a medida que van apareciendo más sistemas exoplanetarios sorprendentes.

Conocemos ya más de 350 exoplanetas en órbita alrededor de más de 200 estrellas cercanas al Sol. Se trata de objetos alojados en sistemas que pueden llegar a contener 5 planetas. Los exoplanetas más pequeños que se detectan actualmente tienen menos de cinco veces la masa de la Tierra. Aunque se anuncien más descubrimientos, debemos ir caracterizando los exoplanetas para comprender las propiedades universales de los sistemas planetarios y las pe-





2. EL TELESCOPIO SPITZER mide más de cuatro metros de altura y unos dos de diámetro. Los empequeñecidos técnicos del Spitzer en Lockheed-Martin están probándolo antes de su lanzamiento (*derecha*). Componen el telescopio (*izquierda*) un espejo primario de 85 centímetros de diámetro, tres instrumentos infrarrojos sensibles y un tanque de helio líquido para enfriar criogénicamente el telescopio y los instrumentos.

CORTESIA DE BALL AEROSPACE (*izquierda*); CORTESIA DEL CENTRO CIENTIFICO SPITZER (*derecha*)/American Scientist



3. LA IMAGEN INFRARROJA de la galaxia Remolino muestra estructuras que no se perciben en longitudes de onda del visible. Los colores se corresponden con cuatro longitudes de onda infrarrojas; el rojo es la más larga.

culiaridades que pudieron desempeñar un papel en la formación de nuestro sistema solar.

Si bien los estudios con los telescopios de superficie y con el Telescopio Espacial Hubble han tenido su relevancia, el Spitzer ha sido la herramienta más poderosa para la caracterización de los exoplanetas. Los resultados prueban que la formación y evolución de los sistemas planetarios es un tema mucho más rico de lo que se había anticipado.

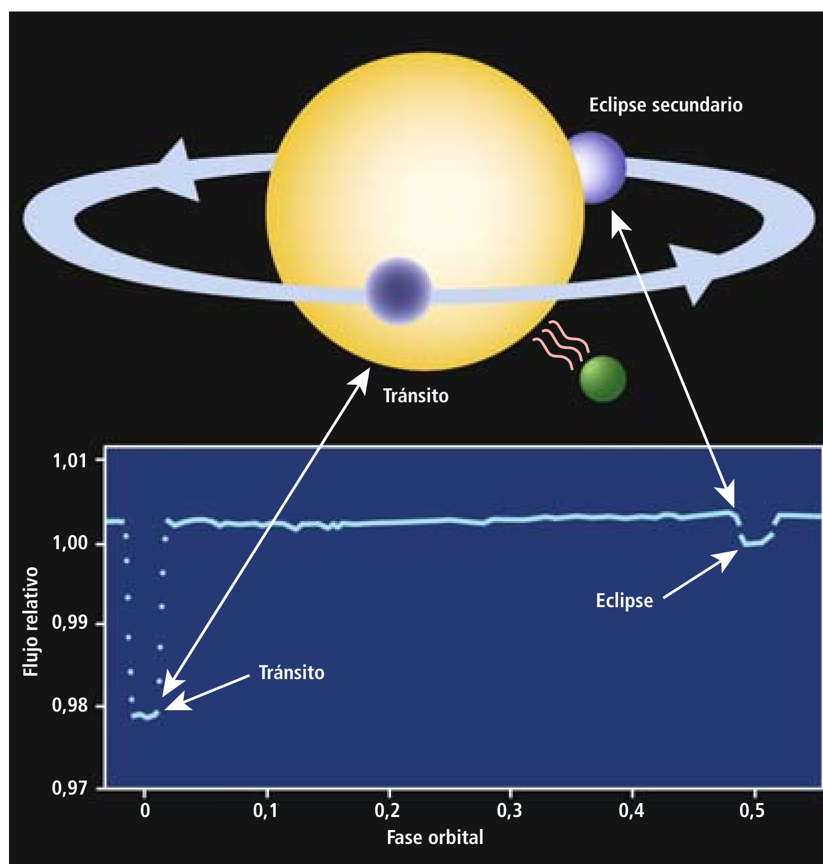
Un exoplaneta grande próximo a su estrella —y, por tanto, calentado a una temperatura de unos 1000 kelvin o más— puede ser lo suficientemente brillante en el infrarrojo para que el telescopio Spitzer lo detecte si se encuentra a menos de 200 años-luz de distancia del Sol. El telescopio ha detectado a estos Jupíteres calientes en cierto número de casos al separar temporalmente, que no espacialmente, la luz de la estrella de la luz del planeta. Esta técnica se aplica sobre todo a los exoplanetas con una órbita vista de canto desde la Tierra. Cuando el planeta pasa frente al disco de la estrella (o "transita"), se produce una caída de la señal infrarroja procedente del sistema estrella-planeta debido al bloqueo físico del disco estelar; ese fenómeno permite estimar el tamaño del planeta.

Cuando el planeta pasa por detrás de la estrella (o entra en el eclipse secundario), se produce de nuevo una depresión en la señal infrarroja, pero en esta ocasión la caída se debe a que no interviene la luz del planeta. La amplitud de la depresión relativa a la señal de la estrella mide la cantidad de radiación infrarroja procedente del planeta. Estas observaciones, que requieren mediciones con una precisión superior al 0,1 por ciento en escalas de horas, son posibles por la alta sensibilidad y fuerte estabilidad del Spitzer, junto con una continuada visibilidad propia de la órbita solar del telescopio.

Las observaciones son especialmente valiosas si se toman a la vez en una multitud de longitudes de onda, empleando el espectrógrafo del Spitzer. Puesto que los Jupíteres calientes son ricos en gas, las diferentes longitudes de onda revelan distintos niveles de la atmósfera o constituyentes químicos diversos. Los datos del telescopio han permitido determinar las temperaturas planetarias y establecer las restricciones sobre composición química (incluida la identificación de vapor de agua) y sobre la estructura y dinámica atmosféricas. El telescopio lleva ya caracterizados más planetas (19 en total) alrededor de otras estrellas que los que existen en nuestro sistema solar; los planetas caracterizados están entre 50 y 200 años-luz de la Tierra.

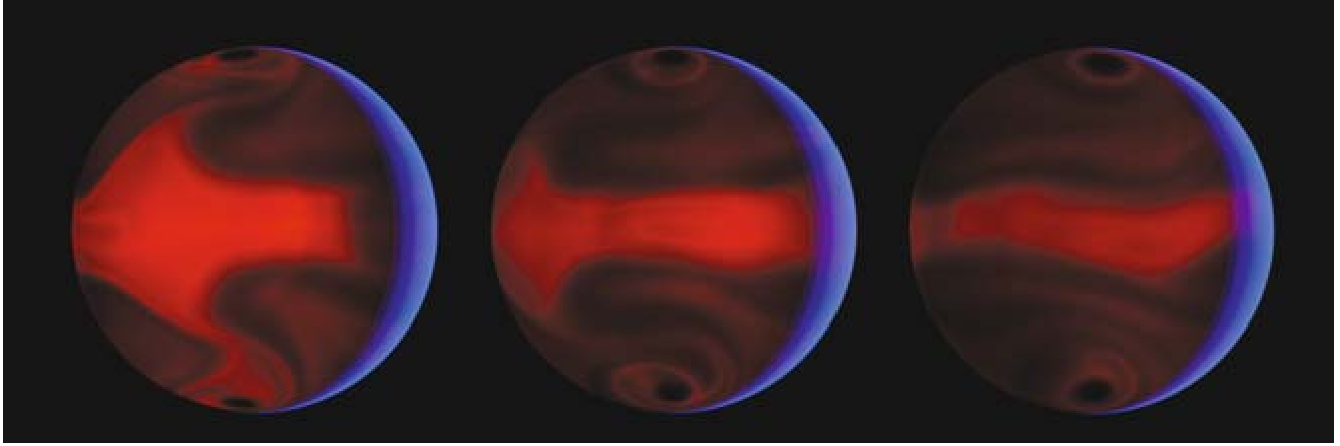
Uno de los estudios comparó las mediciones del Spitzer en cinco longitudes de onda diferentes del exoplaneta HD 189733b con las predicciones de la radiación procedente de un planeta gaseoso, provisto de una composición solar, a la temperatura observada del planeta en cuestión. Los resultados demostraron que HD 189733b no presenta una inversión de temperatura en las capas altas de la atmósfera, al contrario que otros Jupíteres calientes, por lo que deben existir por lo menos dos clases diferentes de atmósferas para este tipo de planetas masivos. La medición clave de la inversión de temperatura será llevada a cabo en muchos otros exoplanetas a lo largo de la misión caliente del telescopio Spitzer, por lo que cabrá esperar nuevas sorpresas.

La órbita solar de Spitzer hace posible la observación continuada de las 40 horas de una órbita planetaria completa, no sólo unas



4. EL TELESCOPIO SPITZER DETECTA LA BAJADA DE LA INTENSIDAD que se produce cuando un planeta extrasolar transita ante su estrella. Cuando el planeta se encuentra detrás de la estrella, eclipsado, la intensidad vuelve a caer de nuevo, en esta ocasión por la pérdida de la emisión infrarroja del planeta. Gracias a esa técnica, el Spitzer logró la primera detección directa de la luz de los exoplanetas. El empuje gravitatorio de los planetas no vistos (*verde*) puede alterar el tiempo de los tránsitos.

CORTESIA DE NASA/JPL-CALTECH/R. KENNICUTT, UNIVERSIDAD DE ARIZONA/DSS (*arriba*); ADAPTACION DE UNA IMAGEN CORTESIA DEL AUTOR, GRAFICA ADAPTADA DE H. A. KNUTSON ET AL., *NATURE*, VOL. 447, PAGS. 183-186 (*abajo*)/*American Scientist*



5. IMAGENES GENERADAS POR ORDENADOR, pero basadas en las observaciones del Spitzer, de los extraordinarios patrones meteorológicos de HD 80606b, un exoplaneta con una órbita muy elíptica. Cuando se aproxima a su estrella, el planeta aumenta drásticamente su temperatura durante unos pocos días, para enfriarse después otra vez cuando el calor estelar se deposita en las capas altas de la atmósfera del planeta.

pocas horas en torno al tránsito o el eclipse. Puesto que estos exoplanetas se hallan anclados por las fuerzas de marea en sus respectivas estrellas, un mismo hemisferio siempre apunta a las estrellas, de igual forma que las fuerzas de marea hacen que la misma cara de la Luna mire con perpetuidad a la Tierra. En órbitas observadas de canto, el hemisferio iluminado se hace poco a poco más visible conforme el planeta se desplaza del tránsito al eclipse.

Este hecho permitió la primera exploración de la variación térmica del día a la noche en un planeta extrasolar, donde los días alcanzan hasta los 1250 kelvin y las noches se enfrían hasta los 970 kelvin. Además, la región más caliente del planeta no es la más próxima a la estrella que circunda, por lo que debe existir un transporte sustancial de calor dentro de la atmósfera planetaria. Se estima que vientos con velocidades superiores a 5000 kilómetros por hora en las capas altas podrían explicar la redistribución del calor estelar.

No todos los exoplanetas están anclados por fuerzas de marea en órbitas circulares. Quizás el resultado más extraordinario del Spitzer hasta la fecha en lo relacionado con el estudio de la estructura y dinámica atmosféricas sea la observación de un "Gran Balanceo". Un planeta en una órbita muy elíptica se abalanzó sobre su estrella en una orientación tal que el telescopio pudo monitorizar la respuesta térmica de su atmósfera al incremento del calor. Afortunadamente, la geometría del sistema es la adecuada para que las observaciones incluyeran también el eclipse secundario. La temperatura de la atmósfera del planeta aumentó desde los 800 a los 1500 kelvin en apenas unas pocas horas, evidenciando que la energía calorífica estelar se deposita en la alta atmósfera del planeta, lo que aporta pistas sobre su estructura.

En estos primeros días de la caracterización de los exoplanetas, sólo cabe maravillarse con la increíble variedad de comportamientos exhibidos por los planetas estudiados hasta la fecha. Recuérdese que todos los resultados mostrados se han obtenido sin haber aislado espacialmente los planetas y sin tener imágenes de ellos. De cara al futuro, anticipamos que los instrumentos recientemente lanzados y los proyectos extenderán nuestro conocimiento y nos llevarán a conseguir las primeras imágenes directas de exoplanetas del tipo del nuestro en los próximos 20 o 30 años.

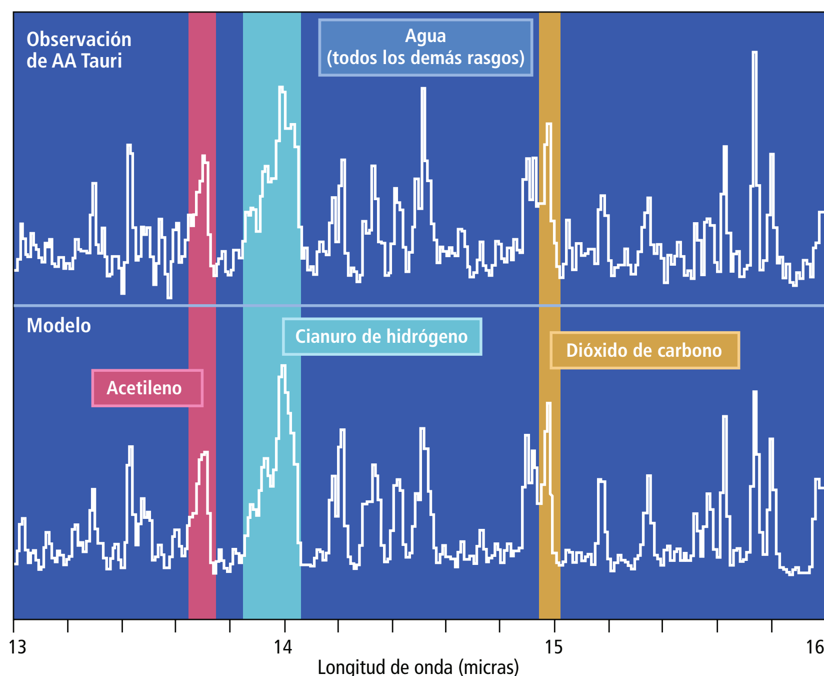
Discos protoplanetarios

Los estudios iniciales del Spitzer sobre discos protoplanetarios o potenciales formadores de planetas se concentraron en medidas de banda ancha con el objetivo de trazar, al menos estadísticamente, su evolución temporal. Los

6. SE OBSERVAN VARIAS GENERACIONES DE ESTRELLAS en esta región, situada a unos 6500 años-luz de distancia, en la constelación de Casiopea. Las estrellas más viejas son los puntos azules en el centro de unas cavidades que ellas mismas han excavado en el medio interestelar, mientras que las estrellas más jóvenes se encuentran en los bordes de las cavidades. Los nudos blancos designan incubadoras estelares, donde se forman las estrellas jóvenes. El color rojizo muestra el polvo calentado; el verde denota las nubes densas de gas y polvo.



ADAPTACION DE UNA IMAGEN CORTESIA DE NASA/JPL-CALTECH/J. LANGTON, UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA EN SANTA CRUZ (*arriba*); CORTESIA DE NASA/JPL-CALTECH/L. ALLEN Y X. KOENIG, CENTRO DE ASTROFISICA HARVARD-SMITHSONIAN (*abajo*)/*American Scientist*



7. EL ESPECTROGRAFO DEL SPITZER registra las señales infrarrojas, en este caso procedentes de los gases alrededor de una estrella joven, AA Tauri, y las ordena según la longitud de onda. Los picos afilados, o líneas espectrales, corresponden a moléculas concretas. El patrón general de las líneas espectrales está asociado al vapor de agua; se observan también los picos de otras moléculas orgánicas simples. La comparación de los datos observados con un modelo, panel inferior de la figura, revela la cantidad, distribución y temperatura de cada una de las sustancias. Este espectro muestra que los materiales orgánicos abundan en los discos protoplanetarios, dentro de los cuales se originan los planetas.

ADAPTACION DE UNA IMAGEN CORTESIA DE NASA/JPL-CALTECH/J. CARR, LABORATORIO DE INVESTIGACION NAVAL/*American Scientist*

resultados probaron, por ejemplo, que la fase polvorienta y muy densa de la vida de los discos alrededor de las estrellas de tipo solar sólo dura unos pocos millones de años; es congruente con las estimaciones del tiempo necesario para la formación de planetas gigantes y gaseosos como Júpiter y Saturno. Al final de ese período, se habría producido ya la agregación de muchas de las pequeñas partículas de polvo presentes en el disco en partículas mayores; la superficie polvorienta del disco se redujo drásticamente por ello y, en consecuencia, mermó la radiación infrarroja. Se piensa que la creación de planetas rocosos como Marte y la Tierra sucede a lo largo de unas pocas decenas de millones de años por la continuada coalescencia y coagulación de las partículas de polvo.

Más recientemente, el énfasis de la investigación se ha desplazado hacia los estudios espectroscópicos de los constituyentes, del polvo y del gas, en los discos. Se propone descifrar la composición y las condiciones físicas del material en los sistemas exoplanetarios. La observación de los estadios tempranos de la formación planetaria ha revelado una rica complejidad de moléculas orgánicas en fase gaseosa; se encuentran presentes el agua, el dióxido de carbono y el monóxido de carbono, precursores de la química orgánica compleja que tuvo lugar en la Tierra y que con el tiempo dio paso a la vida. Unas observaciones que sólo son posibles en el infrarrojo, las bandas principales de longitudes de onda a las que vibran y producen sus espectros; todas las moléculas aducidas se excitan fácilmente a la temperatura típica del material protoplanetario.

Ahora que existen espectros de este tipo de docenas de discos, resulta factible buscar variaciones significativas en las concentraciones de esas sustancias para compararlas con las otras propiedades de los discos y las estrellas centrales. Uno de los hallazgos con implicaciones interesantes ha sido la prueba de que el cianuro de hidrógeno (HCN), compuesto nitrogenado, es menos abundante de lo esperado en el material gaseoso alrededor de las estrellas de baja masa (con menos de la mitad de la masa solar) que en estrellas de mayor masa de tipo solar.

Se admite que la carencia de HCN refleja la fotoquímica del disco de formación planetaria y no representa una anomalía del material que forma la estrella. Una consecuencia posible de la medición es que los sistemas planetarios de estrellas con masas pequeñas podrían ser algo pobres en nitrógeno. Al constituir el nitrógeno uno de los integrantes principales de las moléculas biológicas de la Tierra, cabe inferir que el conjunto de procesos que gobierna el desarrollo de la vida en los planetas de las estrellas de baja masa podría diferir del conjunto del entorno terrestre.

La espectroscopía del polvo, además de la del gas, asociada con los discos protoplanetarios y los sistemas exoplanetarios, ha rendido sus propios frutos. En general, los espectros presentan una emisión suave y continua salpicada de emisiones anchas y rasgos de absorción debidos a los hielos y a los minerales de silicatos. La composición medida de las partículas polvorientas coincide con la del polvo difuso y esparcido por el medio interestelar, pero el estado físico de la materia puede cambiar notablemente. En concreto, los silicatos del medio interestelar se presentan, a juzgar por sus características espectrales, con una forma amorfa, mientras que los asociados a la génesis planetaria y a los discos de escombros muestran con frecuencia los rasgos de emisión más estrechos y propios de los silicatos cristalinos.

A este respecto, el telescopio Spitzer ha aprovechado una oportunidad única de estudiar el material cometario de nuestro sistema solar: en 2005, tomó espectros tras la colisión planificada de la sonda *Deep Impact* con el cometa Tempel 1. Se liberó una nube de gas y polvo, procedente de capas de debajo de la superficie, que persistió unas 40 horas. Los constituyentes principales del polvo observado, tal y como se había inferido de otros cometas del sistema solar, son de nuevo partículas de silicatos cristalinos, muy similares a las que se encuentran en el material exoplanetario.

Resultado que trae a primer plano un nuevo rompecabezas: ¿cómo adoptan los materiales

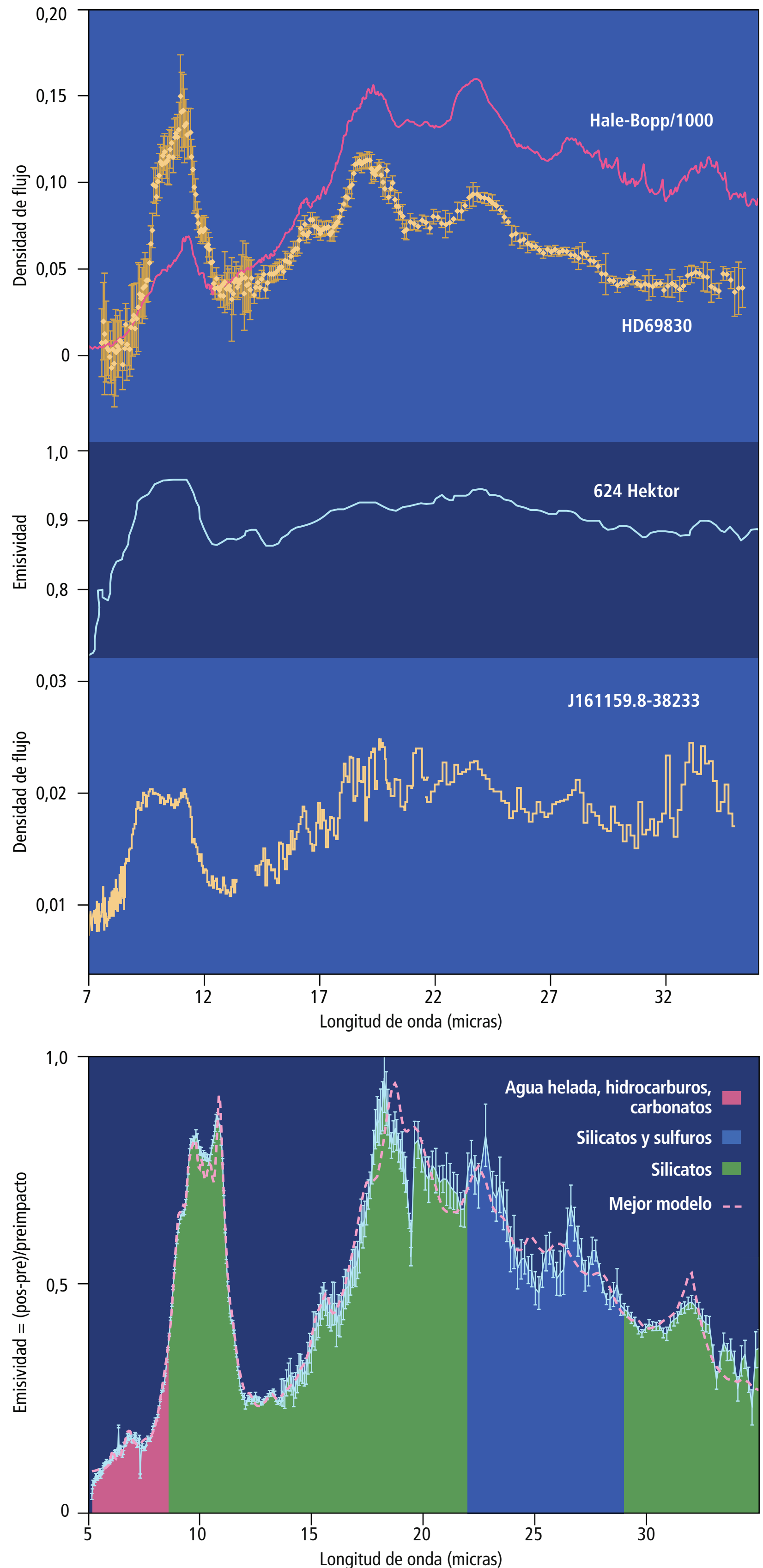
amorfos, los que dominan entre los silicatos del material interestelar del que se hacen las estrellas y los sistemas planetarios, la forma cristalina, soberana en los sistemas planetarios? Se entiende que el material amorfo es recocido, esto es, sujeto a temperaturas superiores a los 1000 kelvin a las que las moléculas individuales de los minerales se liberan para reorientarse, abandonar el estado amorfo y reorganizarse en el nuevo estado cristalino.

Uno de los resultados más recientes del Spitzer nos proporciona el primer dato real del proceso de recocción, a la vez que ejemplifica la aleatoriedad fortuita de cualquier empresa científica. En este caso, una estrella joven, variable y bien conocida que había sido observada por el Spitzer con anterioridad centuplicó su brillo; tamaña fulguración persistió durante varios meses, tras los cuales la estrella se relajó hasta alcanzar el brillo de antes del estallido. Un grupo de astrónomos se percató del fenómeno y observó la estrella otra vez; aunque fue varios meses después del aumento de brillo inicial, todavía brillaba mucho más de lo habitual.

Curiosamente, se detectó un cambio pronunciado en el carácter de las emisiones de los silicatos entre las dos observaciones. En particular, antes del estallido, el material de silicato mostraba una emisión propia de un material amorfo, mientras que la emisión posterior correspondía a un material cristalino. Parece que la fulguración calentó el polvo de la superficie del disco protoplanetario por encima de los 1000 kelvin, lo que imprimió sobre el material amorfo una forma cristalina y modificó la emisión de los silicatos.

Las fulguraciones de ese tipo ocurren con cierta frecuencia durante la evolución de las estrellas con discos protoestelares, por lo que es posible que la transformación a gran escala de lo amorfo a lo cristalino resulte de una acumulación de sucesos parecidos a lo largo del millón de años en los que el disco es denso y se encuentra en las primeras fases de la formación del sistema planetario.

El telescopio Spitzer ha contribuido así a las recientes investigaciones que comparan las propiedades observadas de los sistemas exoplanetarios con las de nuestro sistema solar. Este



8. LAS ESTRUCTURAS SIMILARES de los espectros infrarrojos de dos cometas y un asteroide de nuestro sistema solar, y del material asociado con los sistemas planetarios extrasolares prueban la uniformidad de los procesos en los que se crean los minerales. Estas similitudes motivan el estudio de la “exoplanetología comparada”. Las gráficas presentan, de arriba abajo, los datos del cometa Hale-Bopp, el disco de escombros alrededor de la estrella de tipo solar HD 69830, el asteroide 624 Hektor, una enana marrón joven y, en el recuadro inferior, el cometa Tempel 1.



9. LA NUBE COSMICA BHR 71, a unos 600 años luz de distancia, sólo es una región oscura en luz visible (*izquierda*). En la misma región, observada en longitudes de onda infrarrojas con el Spitzer (*derecha*), se ven estrellas nacientes dentro de la nube (*amarillo*) que emiten potentes chorros de radiación (*verde, degradándose a rojo a medida que se enfrían*). Los chorros son los responsables de la ruptura de la nube observada en la imagen visible.

CORTESIA DE NASA/JPL-CALTECH/T. BOURKE, CENTRO DE ASTROFISICA HARVARD-SMITHSONIAN Y EL EQUIPO DE LEGADO C2D/*American Scientist*

ejercicio transporta la riqueza de nuestro conocimiento detallado del sistema solar a nuestra comprensión de las propiedades de los sistemas exoplanetarios. También nos proporciona una visión más amplia de la formación y evolución del sistema solar de la que podríamos extraer con la limitada perspectiva espacial y temporal que tenemos de nuestro hogar. Esta nueva e importante empresa científica recibe con frecuencia el nombre de "exoplanetología comparada".

Observar las estrellas

El telescopio Spitzer se halla especialmente adaptado para realizar una exploración de extensas áreas que cubran un uno por ciento o más del cielo. El gran angular de los detectores del Spitzer y su alta sensibilidad, además de la gran maniobrabilidad del satélite, hacen posible la exploración profunda de regiones del cielo del tamaño de la constelación de Orión en apenas unos días de observación.

A lo largo de su vida útil, el telescopio ha realizado cierto número de exploraciones de diferentes tipos; algunas, sin ningún sesgo, miran regiones del cielo extensamente estudiadas con anterioridad por otros instrumentos; otras están más enfocadas hacia regiones concretas, con objetivos científicos particulares.

Las estrellas comunes más luminosas de la galaxia son las gigantes K; se encuentran en la penúltima fase de la evolución estelar de las estrellas similares al Sol. Las gigantes K producen grandes cantidades de radiación infrarroja, tanta que el Spitzer puede detectar una gigante K determinada a través de toda la galaxia. Además, la radiación infrarroja penetra en las nubes densas de polvo capaces de bloquear nuestra visión del centro de la galaxia en la luz visible. En consecuencia, una exploración infrarroja es la mejor manera de establecer la distribución de estrellas por toda la galaxia.

Debemos al telescopio un sondeo de ese tipo. Ha tomado imágenes de extensas regiones del plano y del centro de la galaxia, porque éstas son las dos direcciones en que la densidad de estrellas tendría que ser más alta. El análisis de los datos reveló dos hechos importantes relacionados con la distribución estelar galáctica. Tal y como se había conjeturado con los datos de otros estudios, Spitzer confirmó que la Vía Láctea es una galaxia espiral barrada, una clase frecuente en nuestro rincón del universo. En otras palabras, los brazos de la Vía Láctea no son espirales hasta el mismo centro, sino que se originan en los extremos de una distribución de estrellas con forma de barra que se extiende a lo largo de un 30 por ciento del camino entre el centro galáctico y el Sol.

El segundo hecho (no necesariamente relacionado con el primero) contradice indicaciones anteriores. Nuestra galaxia tiene sólo dos brazos espirales en apariencia, cada uno de los cuales sale de un extremo de la barra, en vez de los cuatro brazos identificados a partir de otras mediciones. Puesto que vivimos dentro de la galaxia, no podemos salir de ella para determinar su aspecto a gran escala y compararla con otras galaxias, pero las evaluaciones del Spitzer constituyen un buen comienzo.

Las observaciones de estrellas por parte del Spitzer no se ciñen a las gigantes K. Los cálculos manifiestan que las estrellas provistas de una masa ligeramente inferior a 0,08 veces la solar nunca llegarán a adquirir interiores calientes y densos en la medida suficiente para que la quema de su combustible resulte "autosuficiente". Las "estrellas" en este rango de masas reciben el nombre de objetos subestelares o enanas marrones.

A las enanas marrones, en su juventud, se las puede observar en el infrarrojo por el calor generado durante el colapso gravitatorio. Con el tiempo se hacen más frías y débiles. Por ejemplo, un cuerpo de 0,05 masas solares con una edad parecida a la del Sol, unos 5 mil millones de años, tiene una temperatura predicha de menos de 1000 kelvin y una luminosidad de apenas la millonésima parte de la solar. Incluso una estrella de 0,1 masas solares con la misma edad, aunque será también una estrella muy endeble, se mostraría tres veces más caliente y más de 100 veces más luminosa.

Se espera que las atmósferas de las enanas marrones sean ricas en moléculas. El equilibrio químico del gas molecular y, por tanto, la apariencia de los espectros de los objetos, varían sistemáticamente conforme se enfrían los cuerpos. Estas variaciones se han traducido en tres fases por las que toda enana marrón debe pasar. Los objetos más jóvenes reciben la calificación de enanas L; con el enfriamiento, la química atmosférica cambia y evolucionan hasta convertirse en enanas T. No obstante, queda por descubrir el punto final de la evolución de las enanas marrones: las enanas

El autor

Michael Werner ha venido operando con la Instalación Telescópica Espacial e Infrarroja (SIRTF), hoy Telescopio Espacial Spitzer, desde 1977, y es científico del proyecto desde 1984. Dirige la investigación de astronomía y física del Laboratorio de Propulsión a Chorro. Recibió su doctorado en astronomía de la Universidad de Cornell en 1968.

Y, con temperaturas por debajo de los 500 kelvin.

Las enanas marrones revisten particular interés para los astrónomos. Por muchas razones. Representan una reserva de masa importante en la vecindad solar y son el puente entre las estrellas y los planetas. La identificación de las primeras enanas marrones en 1995 marcó el inicio de una poderosa avalancha de descubrimientos, que recordaba la del hallazgo de exoplanetas. En la actualidad se conocen más de 1000 enanas marrones; parece que podrían ser tan frecuentes a nivel local como los demás tipos de estrellas juntos, pero no tan comunes como para contribuir en mucho a la masa total de las estrellas.

Las observaciones del Spitzer de los cúmulos estelares jóvenes demuestran que los objetos destinados a convertirse en enanas marrones se detectan con la misma facilidad que los destinados a ser estrellas de baja masa, porque en estas fases precoces la luminosidad del acrecimiento de materia domina sobre la derivada de la quema nuclear. Llama la atención que muchas de las enanas marrones que se están gestando en tales cúmulos jóvenes presenten indicios de discos circunestelares donde podrían crecer planetas.

La búsqueda de enanas marrones "de campo" —de mayor edad, más débiles y distribuidas más uniformemente que las enanas marrones de los cúmulos jóvenes— es uno de los objetivos principales de las exploraciones de gran área del Spitzer. Una exploración reciente ha estado enfocada a la identificación de enanas T en un área del cielo unas 50 veces el tamaño de la Luna llena. Se han reconocido cerca de 1 millón de fuentes, entre las que se han identificado 18 enanas T de los tipos más fríos.

Debido a la extrema debilidad intrínseca de las enanas T, el telescopio puede verlas sólo hasta una distancia de 100 años luz, lo que confina cualquier búsqueda a una región muy local. (Por comparar, el centro de la galaxia está a 25.000 años luz.) No obstante, la cifra representa un incremento considerable del monto total de verdaderas enanas T frías de campo, puesto que muchas de las otras ya conocidas fueron descubiertas como compañeras de estrellas de baja masa.

Los resultados permiten también estimar la abundancia de enanas T. El próximo satélite Explorador Infrarrojo de Gran Campo (WISE son las siglas en inglés), cuyo lanzamiento se produjo a finales de 2009, realizará una exploración infrarroja del firmamento. Podrá detectar varios miles de enanas T. Sin duda, se espera que WISE descubra la enana T más cercana a la Tierra. Esta enana T, o quizás una enana Y, podría hallarse más próxima a la Tierra que la estrella más cercana conocida, Próxima Centauri, situada a unos 4 años-luz de distancia.

Todo apunta a que las enanas marrones albergan discos de formación planetaria; por consiguiente, crece la posibilidad de que los exoplanetas más cercanos a la Tierra orbiten, no en torno a una estrella, sino a una enana marrón.

Una visión más amplia y profunda

Debido a la expansión del universo, la radiación de los objetos más y más distantes se va desplazando hacia el final rojo del espectro mientras avanza hacia nosotros. Este efecto, llamado corrimiento cósmico al rojo, determina que las longitudes de onda infrarrojas tengan una particular importancia en los estudios cosmológicos. La longitud de onda de la radiación de los objetos con un corrimiento al rojo, o z, de 1, por ejemplo, se duplica.

El corrimiento al rojo de una galaxia lejana representa una forma de medir la distancia (en el espacio y en el tiempo) a que se encuentra el instante en que la luz salió de allí. Constituye también una medida del factor de expansión del universo desde entonces. Como consecuencia de la velocidad finita de la luz, cuanto mayor sea la profundidad en que miremos en el espacio, más atrás nos remontaremos en el tiempo, ya que la luz necesita para alcanzarnos más tiempo cuanto más diste la fuente. A modo de ejemplo ilustrativo: las mediciones recientes indican que la edad actual del uni-

10. LA IMAGEN COMPUESTA DE N49, el resto de supernova más brillante de la Gran Nube de Magallanes, muestra el poder de la astronomía multiespectral. Revela gas caliente en rayos X (*azul*) identificado por el Observatorio Chandra de rayos X, y gas más frío en el infrarrojo (*rojo*) observado con el telescopio Spitzer. Los filamentos que enhebran esta radiación difusa han sido detectados en luz visible con el Hubble. Todo ese material fue expulsado de una estrella de gran masa en una explosión catastrófica que redujo la estrella a una simple brasa. Se pensaba que el polvo generaba casi todo el infrarrojo, pero la verdad es que gran parte de la señal infrarroja se origina en los gases.



CORTESIA DE NASA/CXC/CALTECH/S. KULKARNI Y COL.; NASA/STScI/UIUC/Y. H. CHU Y R. WILLIAMS Y COL.; NASA/JPL-CALTECH/R. GEHRZ Y COL./*American Scientist*



11. LAS PRIMERAS IMAGENES tomadas durante la misión caliente del Spitzer prueban que el satélite todavía puede captar regiones repletas de nuevas estrellas cuando mira a través del polvo que oscurece la luz visible. La nube DR22 presenta polvo en color azul y gas caliente en naranja (*izquierda*). La galaxia NGC 4145 (*arriba a la derecha*) está en relativa calma, con poca formación estelar. La estrella moribunda, o nebulosa planetaria, NGC 4361 (*abajo a la derecha*) es atípica, pues tiene cuatro chorros de material expelido en lugar de dos, lo que podría indicar que en realidad se trata de un par de estrellas.

CORTESIA DE NASA/JPL-CALTECH/*American Scientist*

verso, el tiempo transcurrido desde la gran explosión (Big Bang), es de 13.800 millones de años. Las galaxias con un corrimiento al rojo de 1,5 corresponden a un universo con un 40 por ciento de su tamaño actual y una edad de unos 6000 millones de años.

Cuando el telescopio Spitzer examina corrimientos al rojo de 6, por ejemplo, no sólo está mirando una época en la que el universo tenía el 15 por ciento de su tamaño actual, sino que también se remonta a la edad de 900 millones años después de la gran explosión. El Spitzer ha sacado a la luz muchas características de la evolución galáctica al observar galaxias con corrimientos al rojo grandes y galaxias más cercanas (las Nubes de Magallanes, Andrómeda).

Los cúmulos de galaxias, que pueden tener masas de unos 1000 billones (es decir, 10^{15}) veces la masa solar, son las mayores estructuras del universo. La misma exploración que proporcionó el censo de enanas marrones está produciendo un censo de cúmulos de galaxias pertenecientes al universo temprano. Analizando pequeñas regiones del cielo previamente investigadas en otras longitudes de onda, el telescopio Spitzer ha encontrado un prominente cúmulo de galaxias, o grupo ligado gravitatoriamente, con un corrimiento al rojo de 1,4. El telescopio “ve” esos lejanos cúmulos con cierta facilidad porque la luz estelar del visible se halla desplazada al infrarrojo.

Las observaciones han permitido la identificación de más de 100 cúmulos de galaxias con corrimientos superiores a 1 en una región del cielo, muchos más de los que se habían reconocido en todo el cielo con observaciones anteriores.

El número y las propiedades de los cúmulos de galaxias de alto corrimiento al rojo arrojan pistas sobre el modo en que se formaron y crecieron dichas estructuras en el universo primitivo. Sabemos por las observaciones de la radiación del fondo de microondas, todavía hoy presente en el cosmos, que el universo primitivo era suave y uniforme, con pequeñas fluctuaciones de la densidad y la temperatura superpuestas a un fondo homogéneo. Con el tiempo, las fluctuaciones aumentaron, sobre todo dirigidas por las fuerzas gravitatorias, hasta dar paso a la rica variedad de estructuras que hoy día observamos en el universo que nos rodea.

La identificación de numerosos cúmulos a altos desplazamientos por parte del telescopio, mirando hacia atrás en el espacio y el tiempo, no ayuda a entender cómo se desarrollaron y evolucionaron esas macroestructuras y otras estructuras más modestas. Podría también elucidar el papel, y quizá la naturaleza, de las misteriosas materia y energía oscuras que, al parecer, constituyen la mayor parte de la materia del universo.

El estudio de las galaxias en alto corrimiento al rojo también proporciona claves sobre la evolución química. Siguiendo la estela de resultados previos de IRAS e ISO, nuestro telescopio ha demostrado que la emisión en el infrarrojo medio del medio interestelar de nuestra galaxia está dominada por hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Estas moléculas planas de hidrocarburos se hallan constituidas por anillos hexagonales de carbono, junto con sus átomos de hidrógeno asociados. Los HAP, muy familiares en la Tierra, son productos de la combustión estudiados a fondo por los químicos. Se ha detectado también su presencia en meteoritos.

A pesar de intensas investigaciones durante las dos últimas décadas, se desconoce todavía

la formación y evolución de los HAP, o cuál es su papel en el transporte de materiales orgánicos a los sistemas de formación planetaria. El telescopio Spitzer ha añadido un nuevo elemento en estos estudios al observar que los espectros de emisión de HAP de galaxias lejanas con un corrimiento al rojo de 2,7 son virtualmente idénticos a los de las galaxias cercanas. Se desprende de ello que ese componente del medio interestelar podría haberse dado ya apenas unos pocos miles de millones de años después de la gran explosión.

El Spitzer se encuentra preparado para detectar galaxias lejanas con un corrimiento al rojo de 7, lo que significa que la luz que ahora veríamos abandonó la galaxia cuando el universo contaba sólo con un 12 por ciento de su tamaño actual y un 5 por ciento de su edad. Los resultados del Spitzer apuntan a que una parte considerable de la formación estelar acontecida en las galaxias más antiguas del universo tuvo lugar antes de lo predicho por la mayoría de los modelos. Controvertidos pero tentadores, los resultados del telescopio auguran la existencia de galaxias muy masivas con corrimientos al rojo superiores a 6. La confirmación de semejante resultado representaría el mayor desafío al esquema de la formación de galaxias que se ha ido elaborando durante los últimos años.

La misión caliente del Spitzer

Tras el agotamiento del helio líquido, el sistema de enfriamiento radiativo del telescopio Spitzer y su órbita heliocéntrica —que le lleva lejos del calor de la Tierra— le han permitido permanecer con una temperatura estable por debajo de los 30 kelvin. Dos de los detectores del Spitzer, los que cubren las bandas de longitudes de onda más corta, a 3,6 y 4,5 micrómetros, tienen la misma alta sensibilidad que antes. La misión caliente del Spitzer, con ambos detectores, seguirá operando durante al menos dos años más, hasta mediados de 2011, con la posibilidad de una ampliación otros dos o tres años, antes de que deje de ser fácil comunicarse con el satélite.

Gran parte del tiempo disponible para las observaciones durante estos dos primeros años de misión caliente se ha asignado a equipos científicos que llevarán a cabo programas extensos y de interés general. Algunos de los temas cubiertos resultan familiares: estructura galáctica, cúmulos de galaxias y el universo lejano. En estas áreas, el Spitzer caliente extenderá los resultados de la misión criogénica.

En la dinámica área de la investigación exoplanetaria, el Spitzer caliente va a proporcionar un medio, muy necesario, para el seguimiento de los nuevos descubrimientos que serán anunciados durante los próximos meses, incluidos los hallazgos de la misión Kepler, la primera misión espacial de la NASA dedicada por completo al estudio de los exoplanetas.

Se ejecutarán también programas nuevos, como el seguimiento de la variabilidad de las estrellas jóvenes en etapas de formación, que permitirá estudiar las estrellas como los discos de formación planetaria; se acometerá la medición de cientos de objetos próximos a la Tierra (asteroides y cometas extinguidos) para determinar sus tamaños y predecir los peligros que estas poblaciones podrían representar para la Tierra.

Habrá una reevaluación de la escala local de distancias para proporcionar un valor mejorado de la constante de Hubble, que relaciona la velocidad de recesión de una galaxia con su distancia actual. Junto a lo que vaya aportando la misión caliente del Spitzer, los próximos dos años deberían ser testigos de un continuo flujo de resultados de la misión criogénica, conforme se vaya explotando el archivo de datos del satélite.

Otras misiones se sumarán al Spitzer caliente para reforzar la exploración infrarroja del universo en los próximos años. En mayo de 2009, la Agencia Espacial Europea y la NASA lanzaron con éxito el Observatorio Espacial Herschel. Corresponderá a éste extender el trabajo del Spitzer hacia longitudes de onda aún más largas, analizando objetos más fríos y quizá más alejados. Sus espectrómetros estudiarán los átomos y las moléculas interestelares con una precisión inaudita.

La misión WISE mencionada anteriormente realizará una exploración muy sensible de todo el cielo en longitudes de onda del infrarrojo.

En unos pocos años, el observatorio SOFIA comenzará a transportar instrumentos por encima de la atmósfera terrestre para acceder a gran parte del espectro infrarrojo. Puesto que se trata de un observatorio instalado en un avión, SOFIA también apoyará el desarrollo y despliegue de instrumentos novedosos como preludio de su utilización en el espacio.

Finalmente, a mediados de la próxima década, llegará el Telescopio Espacial James Webb; con 50 veces más área que el Spitzer, llevará el trabajo de sus antecesores hasta profundidades sin precedente.

Por tanto, a medida que el rico legado científico del telescopio Spitzer siga creciendo durante los años venideros, recordaremos el día en que se quedó sin helio con un poco de tristeza, pero también como el comienzo de una era excitante de nuevos desafíos científicos, oportunidades y descubrimientos.

Bibliografía complementaria

THE LAST OF THE GREAT OBSERVATORIES: SPITZER AND THE ERA OF FASTER, BETTER, CHEAPER AT NASA. G. H. Rieke. University of Arizona Press; Tucson, 2006.

FIRST FRUITS OF THE SPITZER SPACE TELESCOPE: GALACTIC AND SOLAR SYSTEM STUDIES. M. Werner, G. Fazio, G. Rieke, T. L. Roellig y D. M. Watson en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 44, págs. 269-321; 2006.

THE NASA SPITZER SPACE TELESCOPE. R. D. Gehrz y col. en *Review of Scientific Instruments*, vol. 78, pág. 011302; 2007.

A MAP OF THE DAYNIGHT CONTRAST OF THE EXTRASOLAR PLANET HD 189733B. H. A. Knutson y col. en *Nature*, vol. 447, págs. 183-186; 2007.

THE SPITZER VIEW OF THE EXTRAGALACTIC UNIVERSE. B. T. Soifer, G. Helou y M. Werner en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 46, págs. 201-240; 2008.

LA DOBLE VIDA DEL ATP



La molécula de ATP, fuente de energía esencial en el interior celular, transmite mensajes cruciales entre células. Esa doble función sugiere nuevas vías para el tratamiento de numerosas enfermedades

BALJIT S. KHAKH Y GEOFFREY BURNSTOCK

CONCEPTOS BASICOS

- El ATP, archifamoso por constituir el combustible de uso universal en el interior celular, desempeña también funciones de molécula señalizadora que afecta al comportamiento de las células.
- Las señales del ATP resultan esenciales para las funciones básicas y el desarrollo del organismo.
- Dada la ubicuidad del ATP, sus efectos varían de un tejido a otro, lo que facilita la adquisición de nuevos conocimientos sobre una amplia gama de enfermedades y las diversas formas de tratarlas.

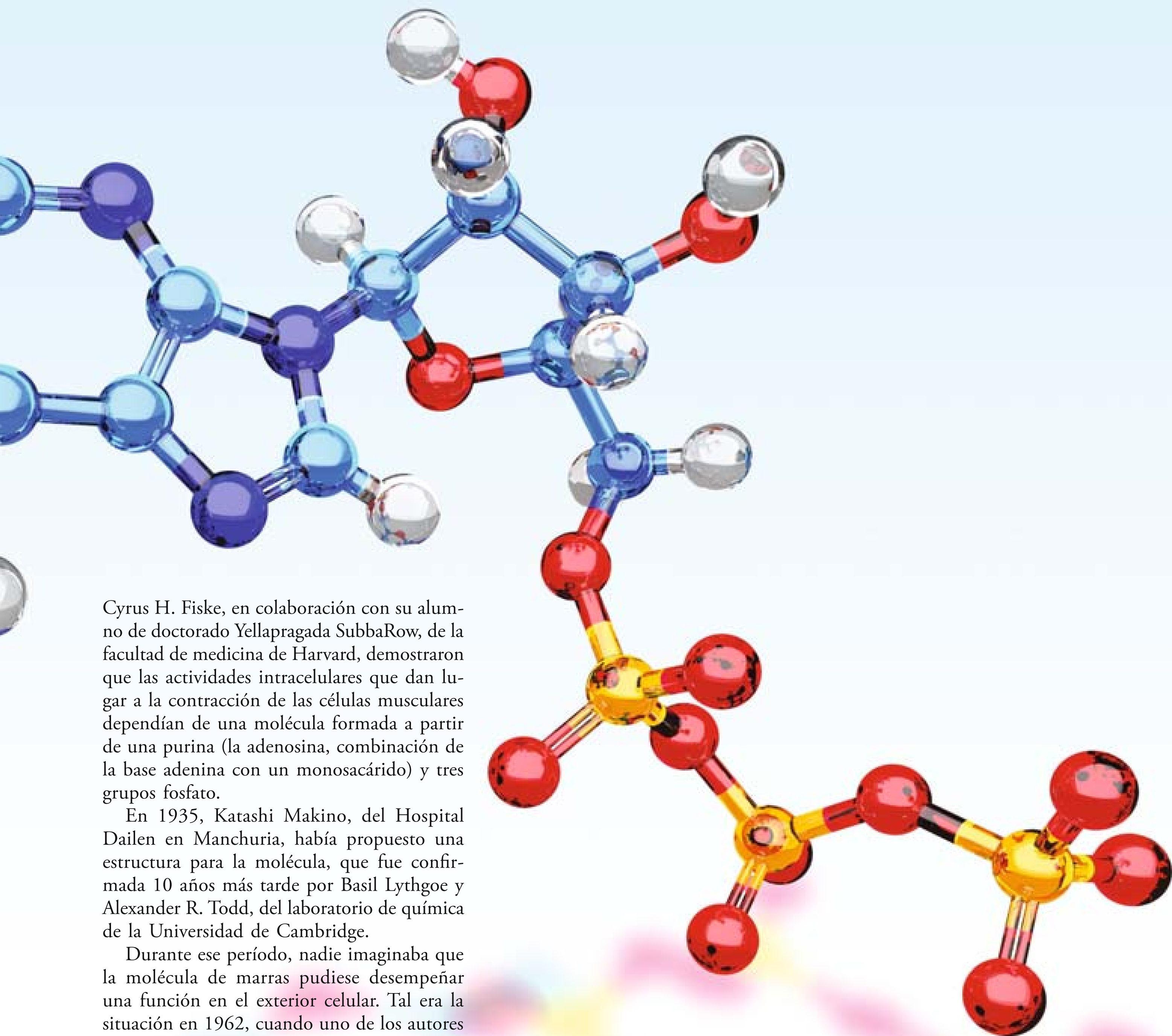
En clase de biología, una de las primeras cosas que aprenden los estudiantes y que más tiempo perdura en su memoria es que todas las células utilizan como combustible una molécula de tamaño limitado denominada adenosín trifosfato (ATP). Esa fuente de energía universal hace posibles las reacciones biológicas que permiten la actividad celular. Constituye, por tanto, uno de los protagonistas principales del mundo biológico.

Menos conocido es el hecho de que el ATP, quizá la molécula más producida y consumida del organismo humano, desarrolle también una función totalmente distinta, aunque no menos importante, en el exterior celular. Una larga serie de descubrimientos ha demostrado que el ATP constituye una molécula señalizadora crucial, que permite que células y tejidos de cualquier parte del organismo se comuniquen entre sí. El combustible universal forma también la base de un lenguaje común.

Cuando hace casi 50 años se propuso la función dual del ATP, la idea fue recibida con dosis considerables de escepticismo. Pero durante los últimos 15 años, una avalancha de descubrimientos ha revelado el modo en que opera el ATP sobre las células desde el exterior y el modo en que interviene en el desarrollo y la actividad diaria de órganos y tejidos. Dada la ubicuidad del ATP, sus efectos de señalización ejercen una influencia extraordinariamente amplia sobre las funciones fisiológicas y proporciona una gama extensa de oportunidades para mejorar la salud humana. Hoy en día, laboratorios de todo el mundo compiten por convertir esos conocimientos en terapias.

El ATP, redescubierto

Cuando en 1929 se descubrió el ATP, investigadores de todo el mundo andaban en busca de una fuente huidiza de energía celular. De forma simultánea, Karl Lohmann, que trabajaba con Otto Meyerhof, del Instituto Kaiser Wilhelm de Investigaciones Médicas de Heidelberg y ganador del premio Nobel en 1922, y



Cyrus H. Fiske, en colaboración con su alumno de doctorado Yellapragada SubbaRow, de la facultad de medicina de Harvard, demostraron que las actividades intracelulares que dan lugar a la contracción de las células musculares dependían de una molécula formada a partir de una purina (la adenosina, combinación de la base adenina con un monosacárido) y tres grupos fosfato.

En 1935, Katashi Makino, del Hospital Dailen en Manchuria, había propuesto una estructura para la molécula, que fue confirmada 10 años más tarde por Basil Lythgoe y Alexander R. Todd, del laboratorio de química de la Universidad de Cambridge.

Durante ese período, nadie imaginaba que la molécula de marras pudiese desempeñar una función en el exterior celular. Tal era la situación en 1962, cuando uno de los autores (Burnstock), entonces un joven neurofisiólogo de la Universidad de Melbourne, estudiaba los nervios que controlan el tejido muscular liso. En el transcurso de sus investigaciones sobre las señales que produce el sistema nervioso autónomo (el que controla las contracciones del intestino, la vejiga urinaria y otras funciones musculares básicas), observó una señalización neuronal en la que no intervenían la acetilcolina ni la noradrenalina, neurotransmisores clásicos.

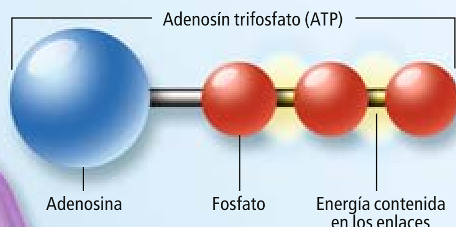
Intrigado por unos datos publicados en 1959 por Pamela Holton, del laboratorio de fisiología de Cambridge, que sugerían que los nervios sensoriales liberaban moléculas de ATP, Burnstock decidió investigar si el ATP podría ser el responsable de la señalización entre los nervios motores y el músculo. Mediante una serie de experimentos en los que utilizó sustancias químicas para bloquear la señalización mediada por los neurotransmisores clásicos que actuaban sobre el tejido muscular liso, demostró que cualquier tipo de señalización prolongada entre los nervios y el músculo debía ser transmitida por el ATP. Tras seguir esa pista durante más de un decenio, Burnstock acumuló la confianza necesaria para proponer, en 1972, la existencia de "nervios purinérgicos", que liberaban ATP a modo de neurotransmisor.

El impulso eléctrico que genera una neurona excitada viaja a lo largo del axón (soma celular), pero no atraviesa ni el diminuto espacio que separa las neuronas (hendidura sináptica), ni el espacio entre éstas y las células musculares. El mensaje se transmite de una célula a otra mediante transmisores químicos, como la acetilcolina, el glutamato y la dopamina; la neurona excitada los libera

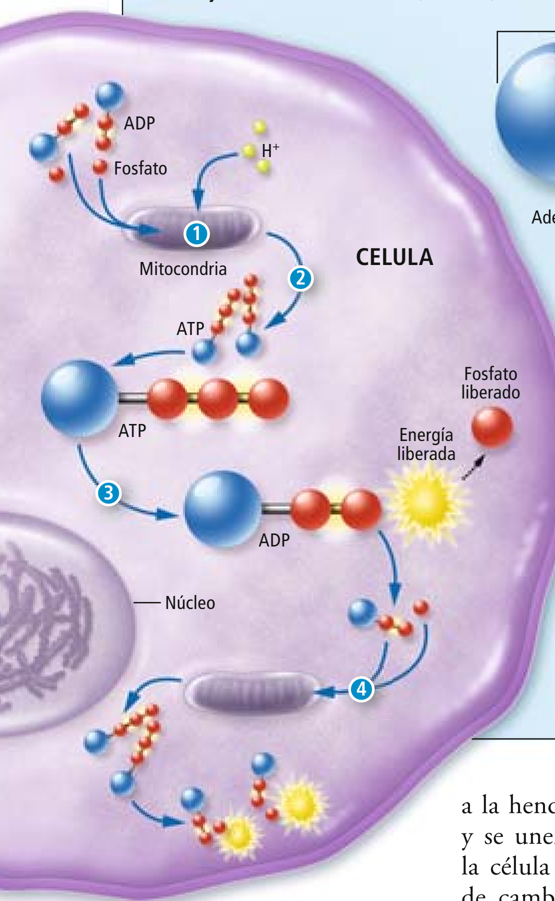
KEN EWARD

EL ATP, DENTRO ... Y FUERA DE LAS CELULAS

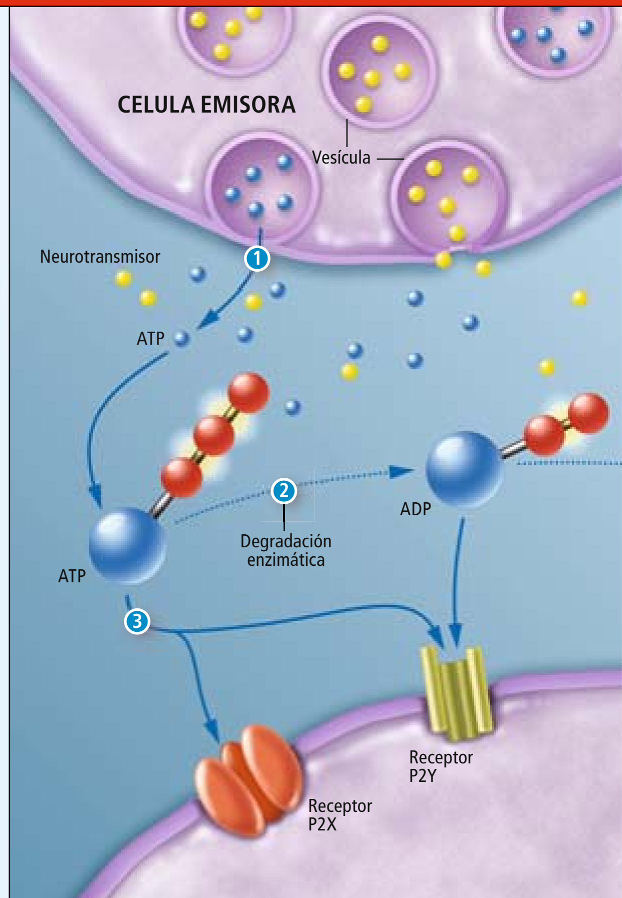
Los estudiantes aprenden que la pequeña molécula de adenosín trifosfato (ATP) constituye una fuente de energía fundamental para la célula; impulsa la maquinaria molecular que se encarga del funcionamiento y la proliferación celular (*abajo*). Pero no todo el ATP intracelular se consume en los procesos celulares. Células de todo tipo liberan ATP para enviar mensajes a las células vecinas (*derecha*).



▲ Una molécula de ATP almacena energía en los enlaces que conectan sus tres grupos fosfato. Los fosfatos están unidos a la adenosina, que pertenece a una categoría de moléculas denominadas "purinas".



◀ Las células producen ATP constantemente en sus mitocondrias. Lo fabrican a partir de materias primas como protones (H^+) procedentes de moléculas de glucosa que han sido metabolizadas. En el interior de las mitocondrias (1) los protones impulsan la unión de un grupo fosfato al adenosín difosfato (ADP); el ATP resultante es liberado en el citoplasma (2). Las actividades celulares como la síntesis de proteínas extraen energía de las moléculas de ATP cuando se libera el grupo fosfato terminal (3). Luego, el ADP y los grupos fosfato libres se reciclan volviendo a formar ATP (4).



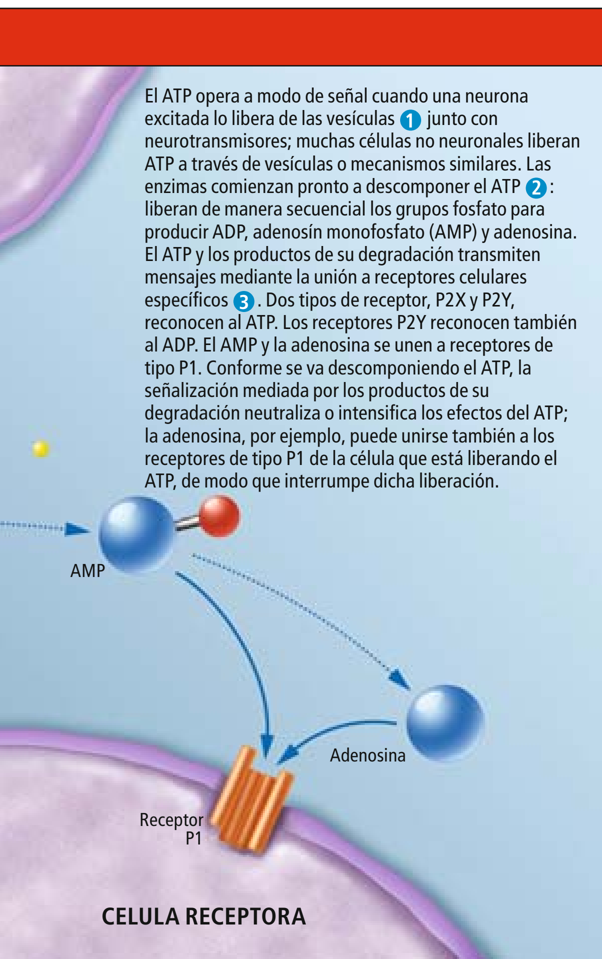
a la hendidura sináptica, atraviesan la brecha y se unen a proteínas receptoras alojadas en la célula destinataria. Ello provoca una serie de cambios internos en la célula receptora, que modifican su actividad. Las neuronas que reciben el mensaje puede que propaguen el impulso; las células musculares, se contraen o se relajan. La transmisión de los mensajes a lo largo del circuito neuronal se produce, pues, mediante una serie de procesos que alternan impulsos eléctricos y descargas químicas.

Durante largo tiempo se creyó que cada neurona emitía sólo un tipo de neurotransmisor. A las células que liberaban acetilcolina se las denominó colinérgicas; a las que liberaban dopamina, dopaminérgicas, y así sucesivamente. El concepto de neuronas purinérgicas sugerido por Burnstock no se basaba sólo en sus observaciones, sino también en las investigaciones preliminares que llevaron a cabo varios discípulos y colaboradores, entre ellos Max Bennett, Graeme Campbell, David Satchell, Mollie Holman y Mike Rand, de las universidades de Melbourne y Londres.

No obstante, a pesar de la abundancia de datos que demostraban que las neuronas liberaban ATP hacia los tejidos del músculo, el intestino y la vejiga urinaria, los neurofisiólogos seguían mostrándose reticentes a la idea de que los nervios liberasen ATP a modo de mensajero; por una razón principal: consideraban improbable que una sustancia tan ubicua desempeñara una función tan específica. Además, para que una molécula señalizadora funcione, debe existir un receptor apropiado en la célula destinataria. El primer receptor para un neurotransmisor acababa de ser purificado en 1970; no tardó en acometerse la búsqueda de receptores para el ATP.

Sin embargo, mucho antes de que se hallaran tales receptores, numerosos investigadores continuaron aplicando métodos farmacológicos para estudiar el modo en que el ATP liberado por las neuronas transmitía mensajes hacia el músculo y otros tejidos. Basándose en ese trabajo, Burnstock sugirió en 1978 la existencia de varias familias de receptores: unos para el ATP (receptores P2) y otros para el producto final de su degradación, la adenosina (receptores P1). La investigación posterior puso de manifiesto que la activación de los receptores P2 por parte del ATP causaba diversos efectos celulares. Burnstock y su colaborador Charles Kennedy pensaron entonces en la posible exis-

PRECISION GRAPHICS



El ATP opera a modo de señal cuando una neurona excitada lo libera de las vesículas (1) junto con neurotransmisores; muchas células no neuronales liberan ATP a través de vesículas o mecanismos similares. Las enzimas comienzan pronto a descomponer el ATP (2): liberan de manera secuencial los grupos fosfato para producir ADP, adenosín monofosfato (AMP) y adenosina. El ATP y los productos de su degradación transmiten mensajes mediante la unión a receptores celulares específicos (3). Dos tipos de receptor, P2X y P2Y, reconocen al ATP. Los receptores P2Y reconocen también al ADP. El AMP y la adenosina se unen a receptores de tipo P1. Conforme se va descomponiendo el ATP, la señalización mediada por los productos de su degradación neutraliza o intensifica los efectos del ATP; la adenosina, por ejemplo, puede unirse también a los receptores de tipo P1 de la célula que está liberando el ATP, de modo que interrumpe dicha liberación.

tencia de subtipos de receptores P2, a saber, P2X y P2Y.

Con todo, la hipótesis de la función neurotransmisora del ATP siguió generando controversia; durante años contó con la oposición de muchos. Hasta que, entrados en los noventa, nuevas herramientas moleculares permitieron aislar los receptores para el ATP y ahondar en sus múltiples y fascinantes efectos sobre las células del sistema nervioso y otros tejidos.

Interacciones y dinámica

Al principio de ese decenio, arranca el Proyecto Genoma Humano y se inicia una era prolífica en el descubrimiento de genes que codificaban proteínas de suma importancia para el organismo humano. Varios de esos genes codificaban receptores del ATP, lo que permitió localizar dichos receptores en diversos tipos celulares. Los estudios sobre la señalización del ATP entraron en una nueva y apasionante época. Los intentos por determinar la estructura molecular de los receptores para purinas demostraron la existencia de una extensa familia de receptores; asimismo, facilitaron la identificación de varios canales y enzimas alojados en la superficie de las células implicadas en la señalización del ATP.

Según lo previsto, se descubrieron dos grandes categorías de receptores. Dentro de esas categorías, había muchos más subtipos de receptores de los esperados. Tamaña diversidad implicaba que se podría actuar sobre determinados subtipos de receptor mediante fármacos altamente selectivos para modular la señalización del ATP sólo en ciertos tejidos o tipos celulares (una idea que ya está dando sus frutos en la actualidad, *véase el recuadro* "Aplicaciones terapéuticas").

Tras la purificación inicial de los receptores para el ATP, se demostró que las dos categorías principales operaban de forma distinta. Los receptores P2X pertenecen a una "superfamilia" de canales iónicos que se activan por medio de los transmisores. Uno de los autores (Khakh), junto con otros investigadores, comprobó que, cuando se hallaban unidos al ATP, los receptores P2X se abrían para formar un canal que permitía el paso al interior celular de iones sodio y abundantes iones calcio. Los receptores P2Y, en cambio, se abrían de un modo distinto: la unión del ATP a su región extracelular iniciaba una cascada de interacciones moleculares en el interior de la célula que resultaba en la liberación de los depósitos intracelulares de calcio. En ambos casos, el calcio activaba mecanismos celulares ulteriores que alteraban el comportamiento de la célula.

Aunque la permanencia del ATP en la hendidura sináptica es breve, los efectos celulares de la activación de los receptores se manifiestan pronto en algunos casos (en cuestión de milisegundos) y con lentitud en otros (a veces, durante años). Una entrada masiva de iones calcio a través de los canales P2X puede provocar que la célula libere otros transmisores; así lo ha demostrado Khakh en tejido cerebral. Además, el calcio liberado por la activación de P2Y puede alterar la función de los genes implicados en la proliferación celular, con los cambios consiguientes operados en el tejido y de consecuencias irreversibles. Si bien la presencia de moléculas de ATP en el espacio extracelular es fugaz, sus efectos biológicos perduran.

Los mecanismos de la señalización del ATP resultan más fascinantes todavía cuando se tienen en cuenta sus interacciones con otros sistemas de señalización del exterior celular. Las ectoATPasas, una extensa familia de enzimas, se alojan en la superficie de la mayoría de las células; allí se encargan de despojar al ATP de sus grupos fosfato, de uno en uno, convirtiendo de forma progresiva una molécula de ATP en adenosín difosfato (ADP), adenosín monofosfato (AMP) y, por fin, adenosina. A su vez, cada uno de los productos de la de-

SEÑALIZACION POR ATP: UNA BREVE HISTORIA

1929 Se descubre que el ATP es la fuente de energía en el tejido muscular.

1929 Albert Szent-Györgyi descubre que las purinas (de la misma familia química que el ATP) ejercen potentes efectos sobre el corazón. ▼



Albert Szent-Györgyi

1945 Se confirma la estructura del ATP.

1959 Pamela Holton demuestra que los nervios sensoriales liberan ATP.

1962 Geoffrey Burnstock demuestra la transmisión de mensajes desde las neuronas al músculo por medio de un nuevo neurotransmisor. ▼



Mollie Holman y Burnstock, 1962

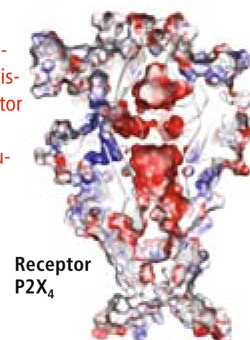
1972 Burnstock propone la existencia de nervios que envían señales por medio del ATP.

1976 Burnstock propone que el ATP actúa como cotransmisor junto con otros neurotransmisores.

1993 y 1994 Se obtienen, a partir de células, receptores P2X y P2Y.

1998 Se empieza a utilizar el clopidogrel, un fármaco que opera sobre los receptores P2Y plaquetarios, para evitar la formación de coágulos en los vasos sanguíneos.

2009 Se determina la estructura cristalina de un receptor P2X (ello debería contribuir al descubrimiento de fármacos). ▶



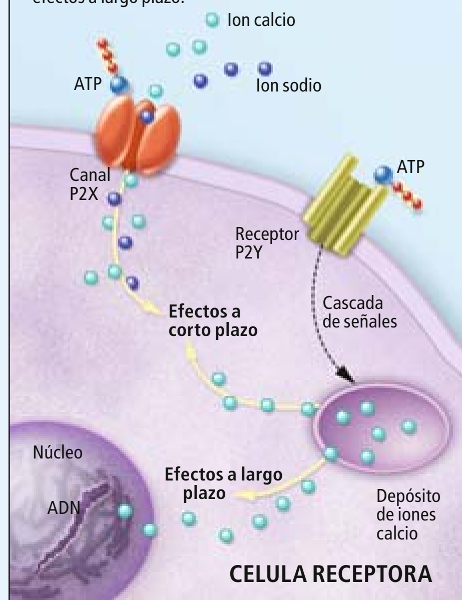
Receptor $P2X_4$

UNA SEÑAL, MUCHOS MENSAJES

Se descubrió la actividad señalizadora del ATP entre las células nerviosas y el tejido muscular. Hoy sabemos que opera en una amplia gama de tipos celulares. Una selección de ejemplos tomados del sistema cardiovascular ilustra la naturaleza de los diversos efectos del ATP y su duración.

TIPOS DE RECEPTOR

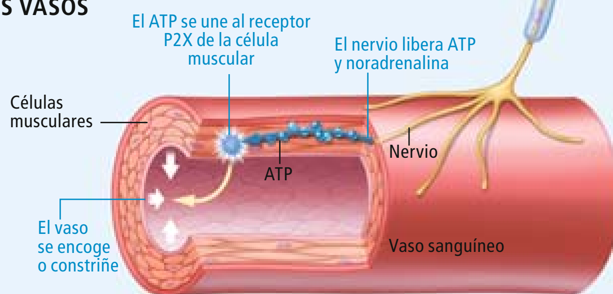
Los receptores celulares para el ATP pueden ser de dos tipos: P2X y P2Y. P2X corresponde a un canal que se abre cuando el ATP se une a su región extracelular, de modo que permite la entrada pronta de iones de calcio y sodio. Cuando una molécula de ATP se une a un receptor de tipo P2Y, éste inicia una cascada de señales internas que provocan la liberación del calcio almacenado en los depósitos intracelulares. En ambos casos, el aumento del calcio desencadena procesos a corto plazo como la contracción muscular. La activación de P2Y inicia también otra serie de interacciones moleculares y la actividad génica responsable de la proliferación celular y otros efectos a largo plazo.

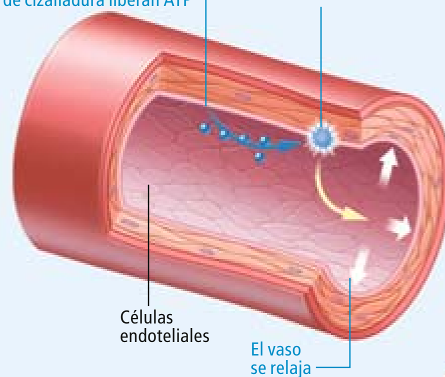


EFECTOS DEL ATP SOBRE LOS VASOS SANGUINEOS

A Constricción ▶

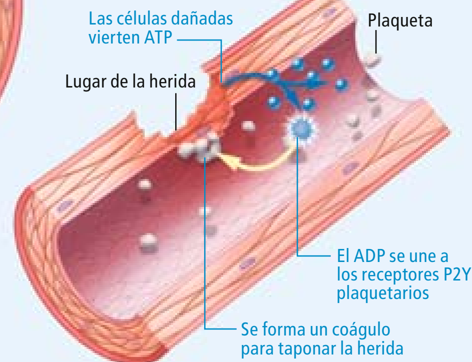
Las células del sistema nervioso simpático liberan ATP junto con el neurotransmisor noradrenalina. El ATP se une a receptores de las células musculares que forman las paredes de los vasos sanguíneos. Con ello, el vaso se encoge de forma súbita.





B Dilatación ◀

Cambios en el flujo sanguíneo producen una “tensión de cizalladura” sobre las células endoteliales que revisten las paredes de los vasos sanguíneos. En consecuencia, las células liberan ATP, lo que activa los receptores de las células endoteliales cercanas. Las células responden con la liberación de óxido nítrico, que relaja los vasos.



C Coagulación sanguínea ▶

En el lugar donde se ha producido una herida, el ATP vertido por las células dañadas se descompone para producir ADP. El ADP se une a receptores en las plaquetas, que se agregan para formar un coágulo sanguíneo que tapone la herida.

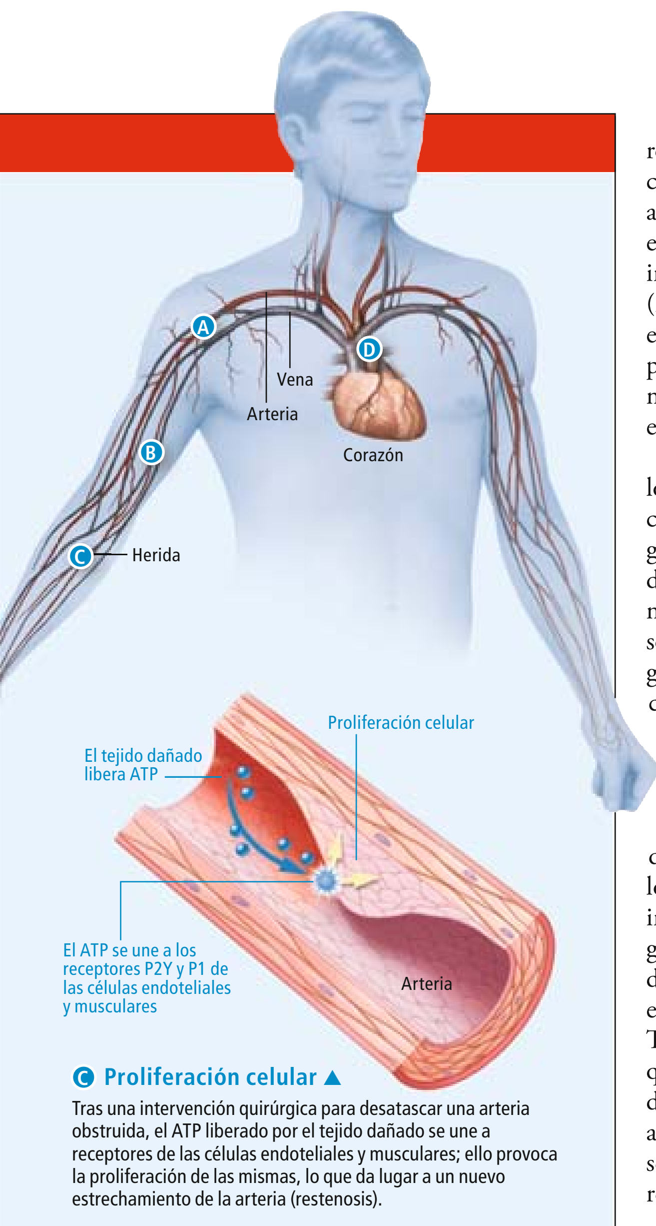
PRECISION GRAPHICS

gradación del ATP puede provocar efectos en la célula, como ocurre cuando la adenosina se une a los receptores P1.

Fusao Kato, de la facultad de medicina de la Universidad Jikey en Tokio, ha demostrado que el ATP y la adenosina actúan de manera concertada en la red del tronco encefálico que se encarga de mantener las funciones básicas del organismo (respiración, ritmo cardíaco y actividad gastrointestinal, entre otras). Sin embargo, se dan otras situaciones en las que el ATP y la adenosina se oponen entre sí: durante la transmisión de señales de una neurona a otra, la adenosina inhibe, en la neurona emisora, la liberación de ATP a la hendidura sináptica. Por tanto, en numerosas circunstancias puede considerarse que los efectos interrelacionados del ATP, sus elementos constituyentes y las ectoATPasas extracelulares crean un bucle de señalización autorregulado.

No son sólo los productos de la degradación del ATP los que influyen en los efectos de esta molécula sobre las células. En el sistema nervioso, el ATP opera también de manera concertada con otros neurotransmisores, a modo de cotransmisor. El descubrimiento de ese fenómeno, realizado por Burnstock en 1976, contribuyó a reconsiderar la idea, durante largo tiempo aceptada, de que una neurona sintetiza, almacena y libera sólo un tipo de neurotransmisor.

Hoy en día contamos con múltiples pruebas que demuestran que el ATP se libera junto con los neurotransmisores clásicos, como la noradrenalina o la acetilcolina. Aunque la cotransmisión se propuso y se demostró para el ATP, se ha demostrado también en otras moléculas: GABA con glicina, dopamina con serotonina y acetilcolina con glutamato. El descubrimiento de la cotransmisión ofrece un ejemplo del modo en que el estudio de la señalización del ATP, amén de desvelar principios fisiológicos generales, han conformado y guiado la investigación en otros campos.



C Proliferación celular ▲

Tras una intervención quirúrgica para desatascar una arteria obstruida, el ATP liberado por el tejido dañado se une a receptores de las células endoteliales y musculares; ello provoca la proliferación de las mismas, lo que da lugar a un nuevo estrechamiento de la arteria (restenosis).

En la salud y en la enfermedad

Una vez establecida la función del ATP en la señalización entre las células del sistema nervioso, no debe sorprender que el ATP constituya un elemento clave en la fisiología de los sentidos. En el ojo, los receptores para el ATP de las células nerviosas de la retina afectan a las respuestas de las células ante la información que reciben de los bastones y los conos, los detectores de luz del ojo. A su vez, los nervios de la retina liberan ATP y acetilcolina (cotransmisores) para transmitir su información a los centros de procesamiento sensorial del cerebro. Además de esa función cotidiana del ATP, varios grupos de investigación han demostrado que la señalización del ATP en un momento clave del desarrollo ocular embrionario tiene efectos de por vida. Nicholas Dale, de la Universidad de Warwick en el Reino Unido, y sus colaboradores han demostrado que, en un embrión joven, la liberación de ATP en un momento crítico constituye la señal para el desarrollo de los ojos.

La liberación de ATP durante el desarrollo resulta también esencial para la correcta formación de la cóclea, el órgano responsable de la audición; en adultos, la señalización del ATP es crucial para el funcionamiento del oído interno. La mitad de las 50.000 células pilosas (neuronas transmisoras del sonido alojadas en el oído interno) que revisten la cóclea humana presentan receptores para el ATP; se ha demostrado que, en determinadas circunstancias, ello facilita la excitación neuronal.

Las papilas gustativas, las terminaciones de los nervios sensoriales de la lengua, poseen receptores P2X que intervienen en el sentido del gusto. Sue C. Kinnamon y sus colaboradores, de la Universidad estatal de Colorado, han demostrado que el ATP constituye un transmisor fundamental entre las células de las papilas gustativas y los nervios gustativos. Los ratones carentes de los subtipos de receptor $P2X_2$ y $P2X_3$ son incapaces de percibir sabores.

Curiosamente, los receptores $P2X_2$ y $P2X_3$ presentes en las papilas gustativas son los mismos que están implicados en determinados tipos de señalización del dolor. Sabemos desde hace décadas que el ATP introducido subcutáneamente causa dolor. El grupo de Stephen B. McMahon, de la Escuela de Ciencias Biomédicas de Londres (con sedes en los hospitales Guy, King's College y St. Thomas), han demostrado en fecha reciente que el dolor se desencadena por la activación de los receptores para el ATP de tipo $P2X_3$ alojados en las terminaciones de los nervios sensoriales de la piel y que intervienen en la respuesta al tacto y al dolor.

En el dolor neuropático, un tipo de dolor asociado a lesiones en los nervios, interviene el ATP a través de otro mecanismo. Kazuhide Inoue, de la Universidad Kyushu, y Michael Salter, de la Universidad de Toronto, han demostrado que un paso clave para el desarrollo del dolor neuropático implica la activación de receptores para el ATP presentes en las células inmunitarias de la médula espinal (microglía). A su vez, la microglía libera moléculas que causan la irritación de las fibras nerviosas, desencadenando dolor crónico [*véase* "El dolor crónico" por R. Douglas Fields; Investigación y Ciencia, enero de 2010].

Ahora que contamos con un conocimiento más hondo de la función señalizadora del ATP, varias compañías farmacéuticas han apostado por los receptores P2X como nuevas dianas para medicamentos contra el dolor neuropático o el dolor provocado por la inflamación. Y el dolor es sólo uno de los aspectos de la salud humana que pronto podrá beneficiarse de las terapias dirigidas contra el ATP o sus receptores.

Los autores

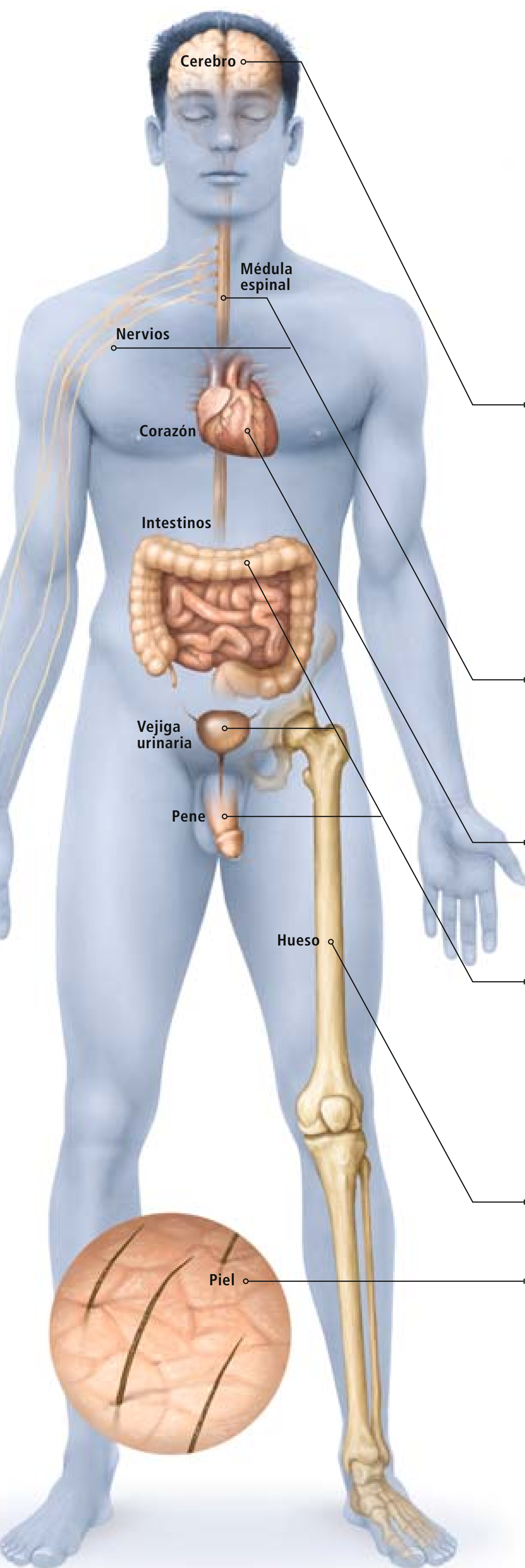
Baljit S. Khakh, profesor de fisiología y neurobiología en la facultad de medicina David Geffen de la Universidad de California en Los Angeles, ha diseñado receptores para el ATP que facilitan el estudio de su función celular. **Geoffrey Burnstock** demostró la función señalizadora del ATP. Dirigió durante 22 años el departamento de anatomía y biología del desarrollo en la Universidad de Londres. En la actualidad preside el Centro de Neurociencias de la facultad de medicina de la Universidad de Londres y del Hospital Royal Free en la capital inglesa.

ORIGEN TEMPRANO

El descubrimiento de receptores para el ATP en plantas y en formas de vida primitivas como amebas y gusanos sugiere que, durante la evolución de la vida, la molécula adoptó pronto una función señalizadora. En el hongo mucoso *Dictyostelium discoideum* (*abajo*), los receptores que se activan por el ATP y que guardan semejanza con los canales P2X humanos controlan el flujo de agua hacia el interior o exterior celular.



CORTESIA DE M. J. GRIMSON Y R. L. BLANTON, UNIVERSIDAD TECNICA DE TEXAS (*hongo mucoso*)



ANATOMIA DEL ATP

En cuanto neurotransmisor, el ATP participa en el funcionamiento del cerebro, la percepción sensorial y el control de músculos y órganos por parte del sistema nervioso. Cuando es liberado por células no neuronales, desencadena a menudo respuestas protectoras como la osteogénesis o la proliferación celular. Se describen a continuación algunas áreas en las que se están llevando a cabo estudios para comprender la versatilidad del ATP y el modo de extraer aplicaciones prácticas.

CEREBRO: El ATP modula la comunicación entre neuronas y entre neuronas y las células que las sustentan (glía). La señalización por ATP y uno de los productos de su degradación, la adenosina, está implicada en el sueño, la memoria, el aprendizaje, el movimiento y otras actividades cerebrales; una señalización excesiva puede guardar relación con la epilepsia y algunos trastornos psicológicos. El ATP, que estimula el desarrollo tisular y la cicatrización, puede promover la muerte celular en el caso de enfermedades neurodegenerativas.

ORGANOS SENSORIALES Y TRASMISION DEL DOLOR: El ATP regula (y en algunos casos, transmite) la información que circula desde los sensores alojados en los ojos, oídos, nariz y lengua hasta el cerebro. Los nervios sensibles al dolor utilizan la molécula para transmitir señales hacia la médula espinal.

CORAZON: El ATP liberado a una con la noradrenalina por nervios del sistema nervioso autónomo estimula las contracciones del músculo cardíaco. Un funcionamiento anómalo de esa ruta de señalización provoca arritmias y cambios en la presión arterial.

OTROS ORGANOS: Durante la digestión, las contracciones intestinales y las secreciones enzimáticas dependen, en buena medida, de la señalización por ATP de los nervios del intestino. También el control y la contracción de la vejiga urinaria se encuentran regulados por el ATP. La erección y relajación del pene requieren señales de ATP que vayan de los nervios al músculo liso y las células endoteliales, que, a su vez, liberan óxido nítrico para relajar el músculo.

HUESO: La activación de los receptores de ATP estimula las células formadoras de hueso (osteoblastos) y reprime las células que lo destruyen (osteoclastos).

PIEL: Los receptores de ATP intervienen en el recambio de las células cutáneas durante la regeneración, la cicatrización y, probablemente, en los trastornos de la proliferación celular como la psoriasis y la esclerodermia.

SISTEMA INMUNITARIO: El ATP liberado por un tejido dañado hace que las células inmunitarias promuevan la inflamación, una respuesta de cicatrización que también causa dolor; una inflamación excesiva y prolongada daña el tejido, como ocurre en la artritis reumatoide. La señalización por ATP ayuda a las células inmunitarias a eliminar las células infectadas por bacterias.

PRECISION GRAPHICS

Entre los beneficiarios de los futuros medicamentos que operen sobre los receptores de ATP se encuentran quienes padecen trastornos cardíacos y cardiovasculares. Los motivos se hacen evidentes cuando consideramos los mecanismos que se activan tras producirse una herida. Las células que se hallan en situación de distrés (estrés con consecuencias negativas) o físicamente dañadas liberan o vierten ATP al espacio extracelular. En esas condiciones, la señalización del ATP provoca, con frecuencia, respuestas de protección y de cicatrización en las que participan las plaquetas, las células sanguíneas responsables de la formación del coágulo que detiene la hemorragia en una herida. Las plaquetas poseen receptores del subtipo $P2Y_{12}$; su activación por parte del ATP extracelular da lugar a la formación del coágulo. Se trata del mismo proceso que contribuye a la formación, en los vasos sanguíneos, de los coágulos que pueden provocar infartos de miocardio y apoplejías.

Uno de los medicamentos más vendidos, el clopidogrel, opera mediante el bloqueo del receptor $P2Y_{12}$ plaquetario, que evita que el ATP promueva la formación de coágulos. Otros fármacos que funcionan de forma similar se encuentran ya en fases avanzadas de ensayo clínico para comprobar su eficacia contra las enfermedades coronarias.

Un área terapéutica adicional es la que guarda relación con el aparato digestivo. James J. Galligan, de la Universidad estatal de Michigan, junto con otros investigadores ha demostrado que el ATP enviado por el sistema nervioso intestinal hacia la pared intestinal opera sobre los receptores P2X y P2Y para controlar las contracciones rítmicas que hacen que el alimento avance a lo largo del tracto digestivo (peristalsis). Mientras tanto, el ATP que se une a los receptores P2Y de las células que revisten la cara interna de la pared intestinal provoca la secreción de enzimas digestivas.

Las compañías farmacéuticas están ya desarrollando compuestos que actúan sobre esos receptores para modular dichas funciones; podrían aplicarse al tratamiento del síndrome del intestino irritado o su manifestación más grave, la enfermedad de Crohn.

La función del ATP en otros órganos y tejidos sanos lo convierte en diana potencial de medicamentos contra una larga lista de trastornos: urinarios, renales, óseos, dermatológicos, neurológicos y psiquiátricos, entre otros. Y no sólo eso, el ATP quizá constituya una de las herramientas naturales del organismo para luchar contra el cáncer.

Eliezer Rapaport, entonces en la facultad de medicina de la Universidad de Boston,

describió en 1983 un efecto antitumoral del ATP. El trabajo se recibió con escepticismo. Sin embargo, investigaciones posteriores realizadas de forma independiente por varios laboratorios han demostrado que el ATP inhibe el crecimiento de tumores en algunos cánceres (de próstata, mama, colorrectal, de ovario y de esófago), así como el crecimiento de las células de melanoma. La señalización del ATP actúa, en parte, para promover el suicidio de las células tumorales y, en parte, para fomentar la diferenciación celular, que ralentiza la proliferación del tumor.

Todo el conocimiento acumulado sobre la señalización del ATP quizá se convierta algún día en nuevos tratamientos médicos. Pero todavía estamos lejos de verlo. Por ahora, numerosos laboratorios farmacéuticos están buscando afanosamente sustancias que activen o silencien determinados subtipos de receptores para el ATP, inhiban o intensifiquen la liberación de ATP, o inhiban la descomposición del ATP una vez que éste haya sido liberado por las células.

APLICACIONES TERAPEUTICAS

La identificación de los subtipos específicos de receptores responsables de los efectos provocados por la señalización del ATP en varios tejidos ha facilitado el desarrollo de terapias contra una serie de enfermedades. Dos de los medicamentos de la tabla inferior ya se comercializan; el resto se halla en fase de estudio.

ENFERMEDAD	MEDICAMENTO	MECANISMO	FASE DE DESARROLLO
Fibrosis quística	Denufosol	Activa los receptores $P2Y_2$	Ensayos de eficacia en humanos (última fase)
Ojo seco	Diquafosol	Activa los receptores $P2Y_2$	Ensayos de eficacia en humanos (última fase)
Inflamación	EVT 401	Inhibe los receptores $P2X_7$	Ensayos de seguridad en humanos (completados)
Dolor	GSK1482160	Inhibe los receptores $P2X_7$	Ensayos de seguridad en humanos (en curso)
	Compuestos sin nombre (fabricados por Evotec AG)	Inhibe los receptores $P2X_3$ y $P2X_{2/3}$	Ensayos en células y animales (en curso)
Artritis reumatoide	CE-224, 535	Inhibe los receptores $P2X_7$	Ensayos de eficacia en humanos (completados)
	AZD9056	Inhibe los receptores $P2X_7$	Ensayos de seguridad en humanos (completados)
Trombosis (coagulación sanguínea aberrante)	Clopidogrel	Inhibe los receptores $P2Y_{12}$	Aprobado
	Prasugrel	Inhibe los receptores $P2Y_{12}$	Aprobado
	PRT060128	Inhibe los receptores $P2Y_{12}$	Ensayos de seguridad y eficacia en humanos (en curso)
	Ticagrelor	Inhibe los receptores $P2Y_{12}$	Ensayos de eficacia en humanos (última fase)

El mensajero por excelencia

La ubicuidad del ATP como molécula señalizadora plantea un gran reto: desarrollar medicamentos dirigidos contra un órgano o tejido sin provocar efectos secundarios en otros sistemas del organismo. Sin embargo, la gran variedad de configuraciones que muestran los receptores alojados en los distintos tipos celulares hará que sea más factible dirigir de forma específica un fármaco hacia un tejido. Khakh ha llevado a cabo experimentos para obtener receptores de ATP que puedan agregarse a células en cultivo o a ratones de laboratorio, a fin de que sirvan para comprobar los efectos provocados por un leve cambio en el funcionamiento de una proteína receptora P2X. Se trata de una estrategia, entre muchas, que permite a los investigadores manipular la señalización del ATP de forma controlada y estudiar los resultados en seres vivos.

Uno de los hallazgos más importantes realizados en los últimos veinte años ha sido la determinación en fecha reciente, por parte de Eric Gouaux y sus colaboradores de la Universidad de Ciencias y de la Salud de Oregón, de la estructura cristalina de un canal P2X del pez cebra. Tan importante hito nos revela detalles a escala atómica sobre el modo en que opera un receptor para el ATP; asimismo, despeja el camino para comprender la señalización del ATP desde el nivel molecular hasta el fisiológico. También acelerará el descubrimiento de fármacos.

Las pruebas recientes sobre la presencia de receptores de ATP en plantas y organismos primitivos como las algas verdes, amebas y esquistosomas parásitos, abre la posibilidad de aplicar el control de la señalización del ATP a la agricultura y al tratamiento de enfermedades infecciosas. Que la señalización del ATP se halle presente en formas de vida tan diversas abona la tesis de que la función señalizadora del ATP surgió en las etapas tempranas de la evolución, quizás al propio tiempo que la función energética. Los numerosos trabajos que describen los potentes efectos que causan el ATP y sus derivados en la mayoría de los invertebrados y vertebrados inferiores sugieren también que la influencia del ATP podría hallarse ampliamente extendida entre los animales.

Para nosotros, resulta gratificante ver que la función señalizadora del ATP ha pasado de considerarse una idea dudosa hace 50 años a convertirse en un campo de investigación vasto y vibrante que, hoy en día, atrae la atención de los biólogos y puede adquirir un interés central en medicina. Los futuros avances en el conocimiento de la doble vida del ATP abrirán nuevas vías para mejorar la calidad de vida del hombre. Estamos deseando verlo.

Bibliografía complementaria

MOLECULAR PHYSIOLOGY OF P2X RECEPTORS AND ATP SIGNALLING AT SYNAPSES. Baljit S. Khakh en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 2, págs. 165-174; marzo de 2001.

PATHOPHYSIOLOGY AND THERAPEUTIC POTENTIAL OF PURINERGIC SIGNALING. Geoffrey Burnstock en *Pharmacological Reviews*, vol. 58, n.º 1, págs. 58-86; marzo de 2006.

P2X RECEPTORS AS CELL-SURFACE ATP SENSORS IN HEALTH AND DISEASE. Baljit S. Khakh y R. Alan North en *Nature*, vol. 442, págs. 527-532; 3 de agosto de 2006.

PHYSIOLOGY AND PATHOPHYSIOLOGY OF PURINERGIC NEUROTRANSMISSION. Geoffrey Burnstock en *Physiological Reviews*, vol. 87, n.º 2, págs. 659-797; abril de 2007.

Iluminar lo {minúsculo}

Una galería de imágenes captadas por microscopía óptica revela la sublime categoría artística de la naturaleza

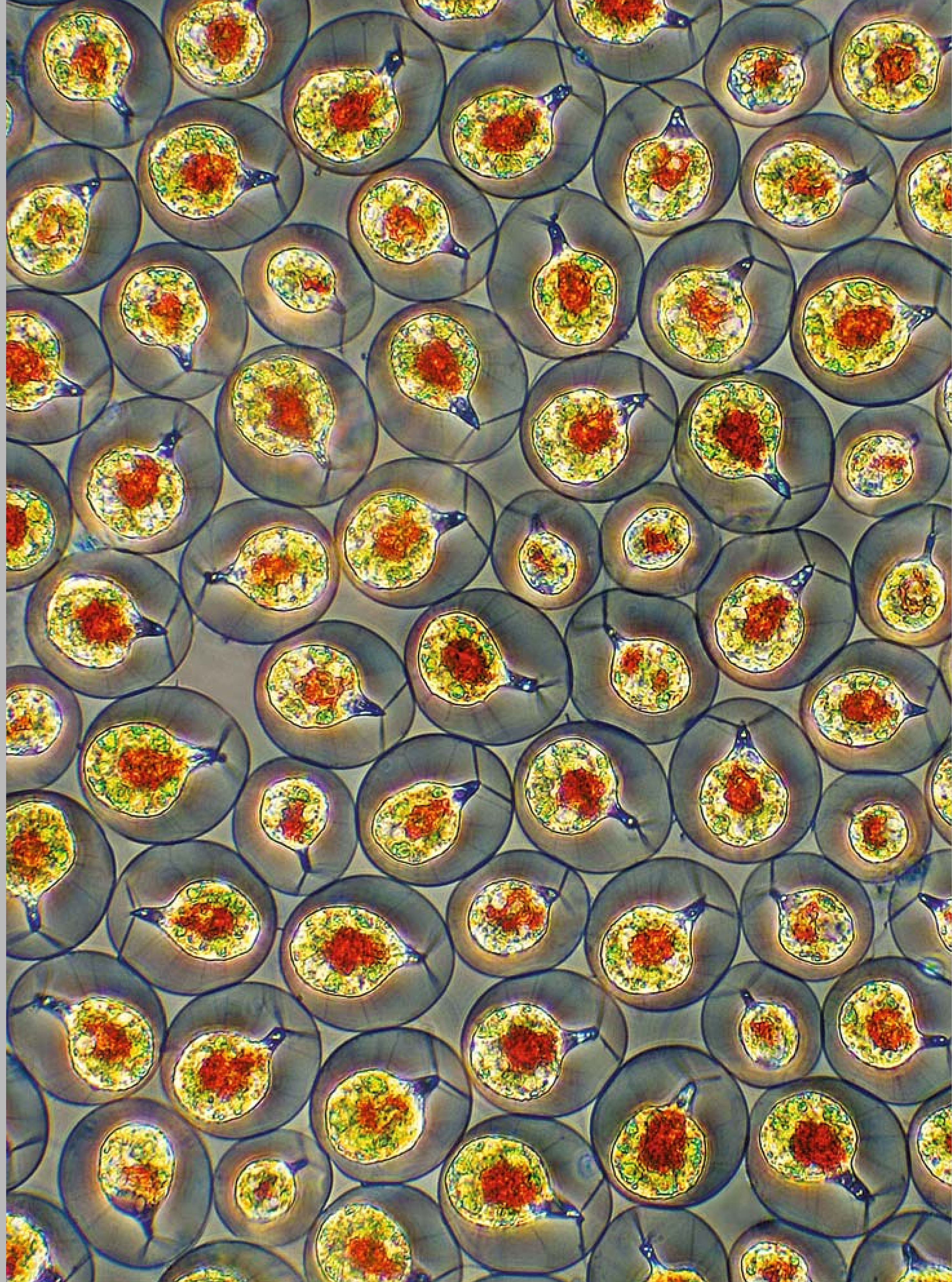
Gary Stix

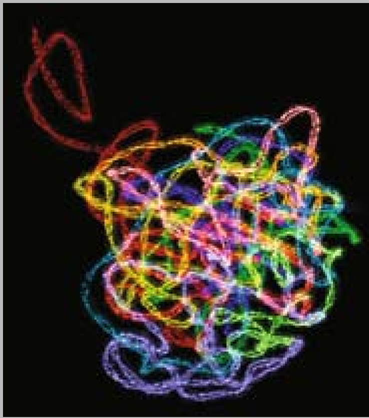
Se acerca el milenario del primer trabajo que describió el modo en que lentes y luz podían emplearse para ampliar los objetos. Fue en 1011, cuando Ibn al-Haytham (Alhacén) empezó a redactar el *Libro de la óptica*, donde describía las propiedades del cristal de aumento, principios que llevarían más tarde a la invención del microscopio. Los participantes del concurso que organiza Olympus sobre imágenes digitales de biopaisajes (*Olympus Bioscaping and Digital Imaging Competition*) rinden un muy digno tributo a los casi 1000 años que lleva lo invisible haciéndose visible.

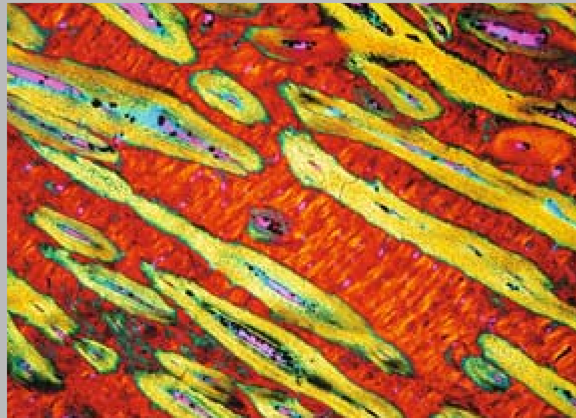
La microscopía óptica, vigorizada por el paso de generaciones de avances técnicos, sigue arrojando pruebas deslumbrantes de que más allá de lo que alcanza el ojo humano existe un mundo desbordante y extenso de objetos diminutos, en nuestro interior y alrededor. La belleza artística del microcosmos la atestiguan estas fotografías del rosario de cuentas llenas de toxina del tentáculo de la carabela portuguesa, de algas unicelulares que parecen hileras de gemas y del patrón rojo y amarillo de un hueso de *Triceratops,* que recuerda a una corbata chillona. Sigue una selección de las imágenes ganadoras y de mención honorífica que nos han resultado más atractivas.

1. Cada tentáculo, peligrosamente letal, de la carabela portuguesa destaca en forma de rosario de cuentas rellenas de toxina (de unas 300 micras de diámetro cada una), que se desprenden en presencia de una presa o por contacto con una víctima humana desprevenida. Alvaro E. Migotto, de la Universidad de São Paulo, captó esta fotomicrografía poco después de que una colonia flotante de *Physalia physalis* fuese extraída de un canal próximo al centro de biología marina de la universidad. Las bandas musculares, responsables de la flexibilidad del tentáculo, aparecen sobre el fondo convertidas en líneas blanquecinas ovilladas.







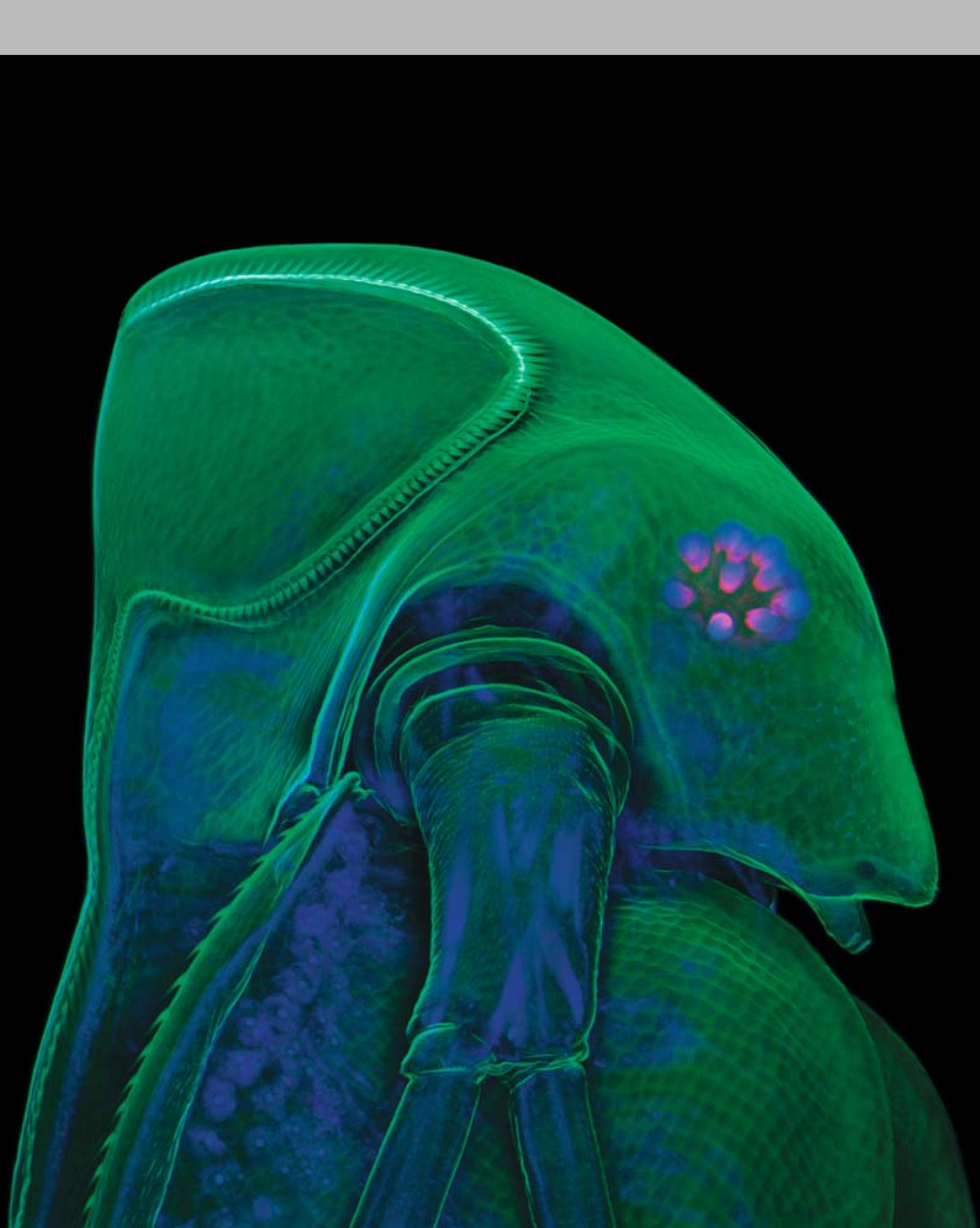


2. PAGINA OPUESTA.
Microalgas que recuerdan a gemas. La coloración roja que exhiben estos organismos unicelulares (de unas 40 micras de diámetro) se debe a la astaxantina, un pigmento carotenoide que se aprovecha para la obtención de colorante rosa salmón. Charles Krebs, fotógrafo profesional de Issaquah (Washington), empleó iluminación por contraste de fase para captar la imagen de una muestra procedente de un abrevadero de aves al aire libre.

3. ARRIBA A LA IZQUIERDA.
El endodermo del maíz aparece en este primer plano del núcleo de una célula vegetal en proceso de meiosis, una forma de división celular. Chung-Ju Rachel Wang, de la Universidad de California en Berkeley, utilizó la microscopía por iluminación estructurada en 3D para obtener imágenes de partes de complejos sinaptonémicos: en concreto, dos cadenas proteínicas alineadas en paralelo, separadas no más de 200 nanómetros, que ofrecen soporte estructural a los cromosomas (*no mostrados*) durante la meiosis. Esa potente y novedosa técnica reveló las estructuras helicoidales de 10 de dichos complejos; cada uno aparece coloreado digitalmente para distinguirlo de los demás.

4. ARRIBA A LA DERECHA.
Una muestra de la placa ósea (escudo) de uno de los mayores cráneos fosilizados del dinosaurio *Triceratops* hallados hasta la fecha muestra la matriz ósea (*fondo naranja*), canales vasculares de 30 micras de ancho (*rosa*) y formaciones óseas alargadas (*amarillo*). El estudio de este fósil, fotografiado bajo luz polarizada por Ellen-Thérèse Lamm en el laboratorio de Jack Homer, del Museo de las Montañas Rocosas de la Universidad estatal de Montana, está arrojando luz sobre la evolución del cráneo de *Triceratops*.

5. ABAJO.
Las células epidérmicas de un paciente de esclerosis lateral amiotrófica fueron reprogramadas para convertirse en células madre, que se diferenciaron luego en neuronas motoras, las células afectadas por el mal. Gist Croft, de la Universidad de Columbia, y Mackenzie Weygandt, del Proyecto ALS, emplearon un microscopio invertido fluorescente para tomar esta instantánea de los núcleos (25 micras de ancho), las neuronas motoras (*verde*) y sus largas fibras transmisoras, o axones (*rojo*); se proponían comparar las células enfermas con sus hermanas sanas.





6. PAGINA OPUESTA.
La pulga de agua (*Daphnia atkinsoni*) luce una suerte de corona en forma de diadema de púas (*estructura espinosa en la cabeza*) y así resultar poco apetitosa a los depredadores. La corona, que mide unas 200 micras entre extremos, se da en las crías de progenitores sensibles a una señal química que emite el camarón renacuajo o "tortuguita" (*Triops cancriformis*). Jan Michels, de la Universidad Christian Albrecht de Kiel, ganador del primer premio, consiguió la imagen mediante microscopía láser confocal de barrido. Bajo la luz láser del microscopio, el exoesqueleto, teñido, aparece en verde fluorescente; algunos tejidos internos se muestran visibles sin necesidad de teñirlos, entre ellos el ojo compuesto, que se torna azul y fucsia.

7. ARRIBA.
Estos embriones de salmón permanecieron inmóviles el tiempo suficiente para aparecer en la instantánea de un alumno del colegio universitario Mount Holyoke. Haruka Fujimaki hizo uso de un microscopio de campo luminoso para captar una imagen de las larvas que había criado como parte de un proyecto de recuperación del salmón atlántico en el oeste del estado de Massachusetts. Las tres larvas, cuyos ojos medían unos tres milímetros de diámetro, acababan de nacer; se hallaban todavía unidas a los sacos vitelinos para su nutrición.

8. ABAJO.
Las extremidades de este embrión de ratón transgénico se tornaron azules para revelar la actividad del factor fibroblástico de crecimiento; la imagen sugiere que esta proteína interviene en el crecimiento de los dedos. Mohammad K. Hajihosseini, de la Universidad de East Anglia, junto con Saverio Bellusci y Stijn De Langhe, fotografiaron el embrión, que había heredado un "gen reportero" que dio lugar a una tinción azul al activarse el gen del factor de crecimiento.

La calidad ecológica de los embalses

Los embalses son ecosistemas creados por el hombre. Proporcionan servicios de gran importancia: abastecimiento de agua, energía hidroeléctrica y actividades recreativas. De su correcta gestión dependen la calidad de sus aguas y el impacto ecológico que generan

Enrique Navarro, Emili García-Berthou y Joan Armengol

Por los ríos españoles circulan anualmente unos 106.000 hectómetros cúbicos de agua. Por culpa de la irregularidad de los caudales sólo se aprovecharían unos 9000, de no ser por los 1200 embalses construidos, que eleva a 53.000 hectómetros cúbicos la cantidad teórica utilizable.

Las necesidades de la población (regadío, consumo urbano e industrial) suman unos 31.000 hectómetros cúbicos anuales. La correcta gestión de los embalses resulta, pues, clave para garantizar la calidad y la disponibilidad del agua. ¿Somos conscientes de la importancia de este recurso? En 2008, tres de los principales diarios españoles dedicaron a los embalses más de 900 artículos (un incremento del 70 por ciento respecto a 2004).

Un primer análisis de los titulares podría hacernos pensar que la mayoría de los artículos se centra en el período de sequía que sufrimos en 2005 y el consiguiente descenso de las reservas hídricas. Sin embargo, una lectura más detenida muestra que esa sequía hizo aflorar la preocupación por la calidad de las aguas represadas y por los conflictos entre las entidades gestoras de los embalses y los usuarios.

El conocimiento profundo del recurso parece prioritario en la gestión adecuada del mismo. Sin embargo, hasta hace poco importaban sólo los parámetros físicos y de caudal del agua embalsada: cuánta agua hay y cuánta se necesita. Bastaba esa información para obtener los máximos rendimientos de producción hidroeléctrica o de caudal para riego o consumo humano.

Desde los años sesenta, el uso extendido de detergentes con fosfatos provocó la llegada a las aguas continentales de gran cantidad de fósforo, que provocó episodios de eutrofización (incremento de sustancias nutritivas en aguas dulces que produce un exceso de fitoplancton). La abundancia de fósforo desequilibró los balances de nutrientes, lo que provocó la proliferación excesiva de algas y de otros problemas asociados (anoxia, mortandad de peces, aparición de algas tóxicas, malos olores, etcétera). Se había olvidado un aspecto básico de toda masa de agua, que constituye un sistema vivo y complejo, de cuyo buen funcionamiento depende en buena medida la calidad del agua embalsada. Fue la primera señal de que algo se estaba haciendo mal. Pronto aumentó el interés por ahondar en la biología de esos sistemas.

Biología de los embalses

Se crearon herramientas para evaluar el estado ecológico de un sistema acuático. Unas de las más utilizadas y aceptadas fueron los índices de estado trófico, que se basaban en diversos parámetros: concentración de fósforo, cantidad de clorofila, transparencia, cantidad de oxígeno disuelto y otros, relacionados con la actividad de los organismos. Los valores obtenidos se transformaban mediante ciertas ecuaciones, para combinarse luego en un valor

CONCEPTOS BASICOS

- Los embalses son sistemas híbridos entre un río y un lago. Presentan características ecológicas asociadas a estos dos sistemas, así como otras que les son exclusivas.
- La Directiva Marco del Agua, en vigor desde 2000, reconoce la necesidad de valorar y, según el caso, mejorar la calidad ecológica de los embalses. Los países europeos tienen hasta 2015 para cumplir dicha normativa; ello requiere el desarrollo de programas de protección, restauración y mejora de la calidad del agua.
- La calidad ecológica de un embalse se mide a partir de la combinación de parámetros físicos, químicos y biológicos.



1. EL EMBALSE DE SANTA FE (Parque Natural del Montseny, Barcelona) es el único embalse distrófico de este estudio. Su cuenca, densamente poblada de árboles de hoja caduca, aporta mayor cantidad de materia orgánica de la que el sistema puede procesar.

ENRIQUE NAVARRO, EMILI GARCIA BERTHOU Y JOAN ARMENGOL

que reflejaba el estado trófico de la masa de agua. Esa información permitía aconsejar a los gestores la adopción de medidas que mejorasen la calidad de las aguas.

Hasta fecha reciente, la falta de recursos o el desinterés dejaron en el olvido a muchos de nuestros embalses. La mayoría de ellos no se estudiaron desde el punto de vista biológico con la frecuencia e intensidad requeridas. La entrada en la Unión Europea y la posterior vigencia de una legislación específica sobre el agua brindaron la oportunidad de enmendar esa carencia.

En el año 2000 entró en vigor la "Directiva Marco del Agua" (DMA), que reconoce la necesidad de valorar el estado ecológico de todas las masas de agua y mejorarlo. Entre las herramientas a utilizar, los protocolos para determinar el índice que permita conocer el estado de nuestros embalses. A semejanza de esos primeros índices de eutrofia, el índice propuesto en la DMA resume en un valor la información física, química y biológica de un embalse.

Durante el verano y otoño de 2002, y el invierno y la primavera de 2003, se estudiaron 21 de los mayores embalses situados en las cuencas hidrográficas del noreste de la península Ibérica. Con el fin de conocer las características físicas, químicas y biológicas de las presas, se seleccionó un punto representativo en cada una, donde se realizaron perfiles físico-químicos (medidas metro a metro entre la superficie y el fondo) y se recogieron muestras biológicas (zooplancton, fitoplancton y pigmentos algales). En la mayoría, se rea-

2. CLASIFICACION DE LOS EMBALSES. Los embalses que reciben aportes de cuencas hidrográficas muy extensas se agrupan en el tipo V; los embalses con cuencas intensamente humanizadas corresponden al tipo VI. En estos embalses (V y VI) es donde resulta más problemática la gestión de la calidad ecológica.

ALTITUD					
> 815 m		< 815 m			
VOLUMEN		DISTANCIA DE LA COSTA			
> 20 hm	< 20 hm	< 25 km	> 25 km		
			CONCENTRACION DE CLORUROS		
			< 40 ppm	> 40 ppm	
				SUPERFICIE DE CUENCA	
				> 10^3 km^2	< 10^3 km^2
Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V	Tipo VI

lizaron, además, pescas eléctricas y con red, que permitieron caracterizar y cuantificar las poblaciones piscícolas.

Clasificación

Para facilitar la gestión de los recursos hídricos, se propuso una clasificación de los embalses. ¿Cuáles debían ser los criterios? ¿Físicos? ¿Químicos? ¿Morfométricos? Se dio por supuesto que el hombre constituía el principal factor de incidencia en el estado de un embalse. Y se agruparon según los factores que más condicionaban la calidad ecológica: en los de cuenca enorme resulta clave controlar las entradas difusas de nutrientes; en los embalses costeros, en cambio, destaca la presión que ejercen las áreas cercanas, densamente pobladas.

Los investigadores seleccionaron las variables que permitían una segregación de los embalses de acuerdo con la altitud, el volumen máximo, la distancia de la costa, la concentración de cloruros y la superficie de la cuenca. Asimismo, se decidieron los valores umbral para cada una de esas variables, de modo que pudieran agruparse, mediante una selección dicotómica, los embalses en tipos.

El potencial ecológico

Una vez definidos los grupos, se seleccionaron las variables físicas, químicas y biológicas que debían estudiarse para conocer el estado ecológico de los embalses. Al tratarse de sistemas artificiales, la DMA propuso la expresión "potencial ecológico" para diferenciarlo del "estado ecológico", que se utiliza para masas de agua naturales. Dicho potencial se establece mediante un índice que integra elementos de calidad biológica, hidromorfológica, química

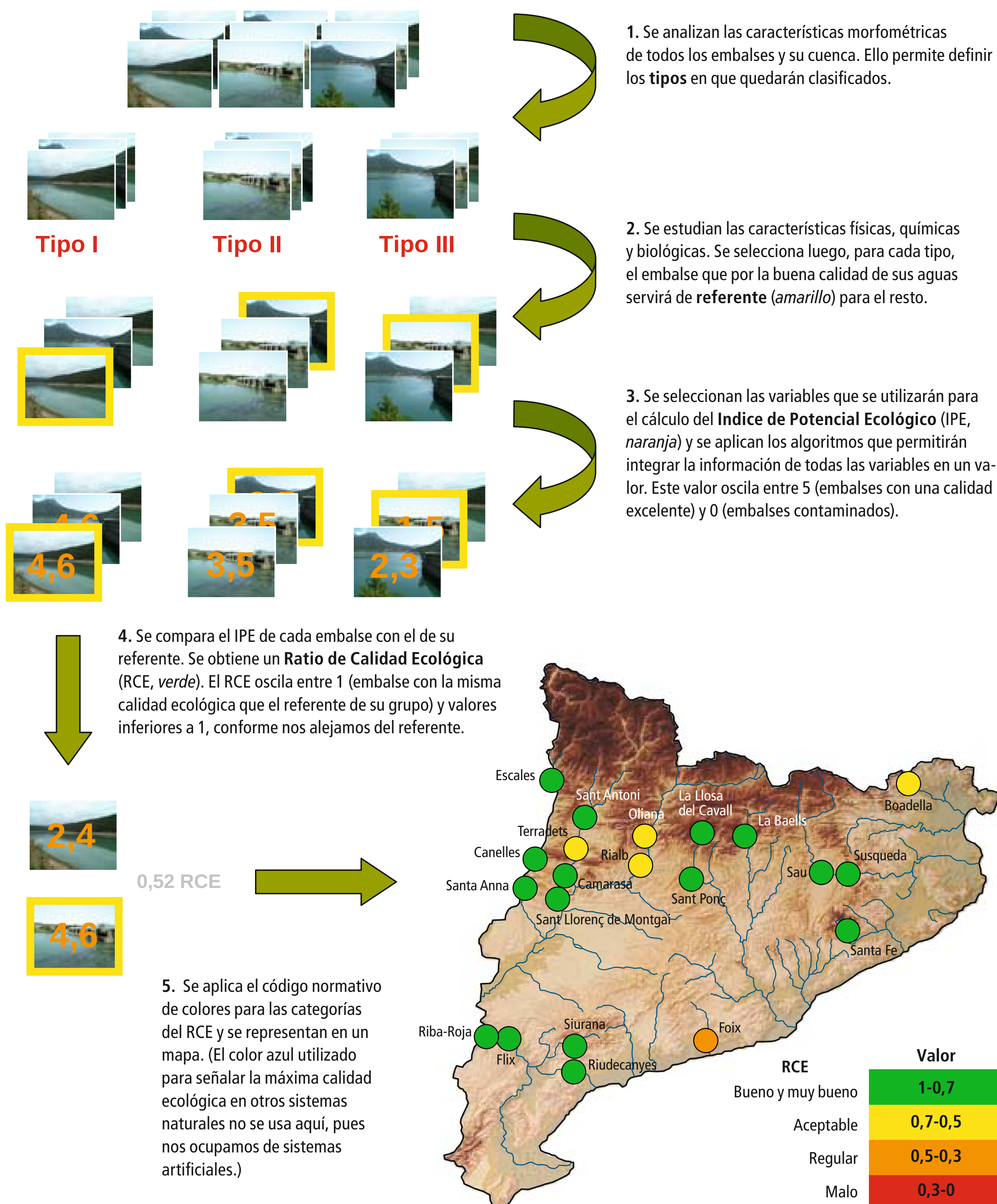


ENRIQUE NAVARRO, EMILI GARCIA BERTHOU Y JOAN ARMENGOL

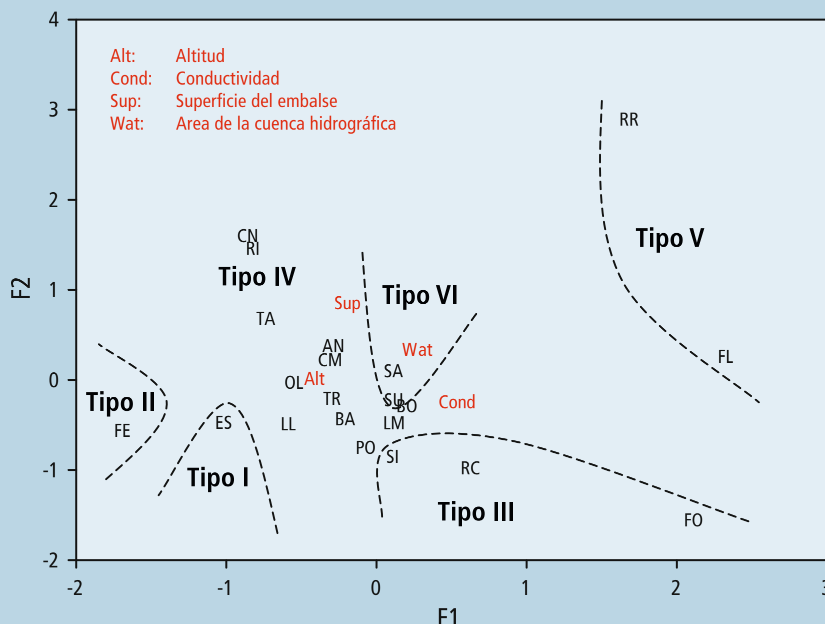
3. EL EMBALSE DE FLIX (Tarragona), en el tramo bajo del Ebro, ha sufrido durante más de un siglo una acumulación notable de residuos. En la actualidad se está elaborando un proyecto de descontaminación.

MAPA DE CALIDAD ECOLOGICA

Las condiciones y el entorno de los sistemas hídricos varían mucho de una zona a otra. Por tanto, no tendría sentido basar en una única escala numérica absoluta la calificación de todos los embalses del planeta. En lugar de ello, la Directiva Marco del Agua indica que debe utilizarse un patrón propio para cada zona. El esquema siguiente muestra el proceso mediante el cual se determina el Ratio de Calidad Ecológica de los embalses de una región.



ENRIQUE NAVARRO, EMILI GARCIA BERTHOU Y JOAN ARMENGOL



EMBALSES

BA	La Baells	LL	La Llosa del Cavall	AN	Santa Ana
BO	Boadella	OL	Oliana	FE	Santa Fe
CM	Camarasa	RI	Rialb	SA	Sau
CN	Canelles	RR	Riba-Roja	SI	Siurana
ES	Escales	RC	Riudecanyes	SU	Susqueda
FL	Flix	LM	Sant Llorenç de Montgai	TA	Talarn
FO	Foix	PO	Sant Ponç	TR	Terradets

ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES. Mediante un conjunto de variables (*rojo*) se compone un espacio bidimensional donde se ordenan los embalses. La proximidad de un embalse a cualquiera de las variables denota el peso que ésta tiene en la posición de cada uno. La variación total explicada por los dos ejes (composición lineal de todas las variables) es del 79,8 por ciento, lo que significa que la posición de un embalse (su clasificación en un tipo u otro) puede atribuirse en casi un 80 por ciento a las variables seleccionadas en el análisis.

Los tipos I y II corresponden a presas de alta montaña. El único componente del Tipo I es un embalse oligotrófico. El del Tipo II, eutrófico; esta eutrofia natural está provocada por la gran masa de materia vegetal que sedimenta en su vaso, ya que su cuenca es básicamente caducifolia. El Tipo III incluye embalses cercanos a la costa, con elevada concentración de cloruros (alta conductividad), tamaño notable y cuencas agrícolas. Los Tipos V (en el Ebro) y VI (en el Ter) poseen las mayores cuencas hidrográficas; ello resultará clave a la hora de mejorar la calidad de sus aguas. El resto de los embalses (Tipo IV) son de tamaño medio, se encuentran en regiones de media y baja montaña y el uso del suelo en sus cuencas es mixto, con predominancia de la agricultura.

ENRIQUE NAVARRO, EMILI GARCIA BERTHOU Y JOAN ARMENGOL

y físico-química. Indice que servirá para establecer comparaciones entre sistemas o para conocer la evolución temporal de un sistema concreto.

Un índice aplicado ampliamente por los expertos en limnología es el de estado trófico de Carlson (TSI, de "Trophic State Index"). El TSI calcula el estado trófico de un sistema acuático a partir de tres variables: concentración de clorofila, profundidad de visión del disco de Secchi (que mide la transparencia del agua) y concentración de oxígeno. Para la determinación del potencial ecológico se seleccionaron esas tres variables y otros parámetros de interés.

Los pantanos constituyen medios propicios para el desarrollo de crecimientos masivos de ciertas algas (algunas cianofíceas) que pueden tener graves efectos sobre la salud humana y del ganado. Por ello, uno de los parámetros propuestos fue la cantidad de estos organismos, que se valora a partir de la concentración de sus pigmentos específicos. Dado que la producción de biomasa en ese medio viene condicionada por la concentración de fósforo, se consideró su presencia. También los datos de las comunidades piscícolas contribuyeron a la determinación del potencial ecológico: por ejemplo, la cantidad de carpas (*Cyprinus carpio*, pez omnívoro asociado a aguas de calidad media y baja).

Una vez decididas las variables, se estableció una correspondencia entre sus valores reales y la categoría de calidad (de mala a muy buena). Estas categorías son modificaciones de las del índice TSI (disco de Secchi, oxígeno y clorofila total), de las guías de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (concentración de fósforo) y de las tablas de la Organización Mundial de la Salud para aguas recreacionales (cianofíceas). Para los peces, se analizaron las escalas del RFAI ("Reservoir Fish Assemblage Index") de la Autoridad del Valle de Tennessee, pero finalmente se seleccionaron métricas relacionas con la abundancia de carpas. Las categorías de calidad varían según el tipo de pantano: una concentración de clorofila total de 4 miligramos por metro cúbico será "aceptable" para un embalse de tipo I, II, III o IV pero "muy buena" para un embalse de tipo VI.

Después de transformar el valor real de la variable en un valor comprendido entre 1 (malo) y 5 (muy bueno), se aplicaron los algoritmos descritos en la DMA para obtener el Indice de Potencial Ecológico.

Se decidió también en qué momento del año resultaba más conveniente el estudio del

Los autores

Enrique Navarro es investigador del Instituto Pirenaico de Ecología del CSIC, ecólogo y ecotoxicólogo acuático. **Joan Armengol** es catedrático de ecología de la Universidad de Barcelona y especialista en ecología de embalses. **Emili García-Berthou** es profesor de ecología de la Universidad de Girona. Centra su investigación en peces continentales.

potencial ecológico. En el caso que nos ocupa se recomendó el control de las variables durante el verano. Los embalses, igual que los lagos de nuestras latitudes, presentan un marcado ciclo estacional. Desde finales de otoño hasta principios de primavera, se produce una mezcla vertical de las capas de aguas superficiales y las profundas, que hace que los nutrientes acumulados en las profundidades se transporten cerca de la superficie, donde las algas los utilizan para generar biomasa. Tras el crecimiento algal de la primavera, llega el verano, que supone la entrada de grandes cantidades de calor en las capas superficiales de agua (epilimnion), lo que reduce su densidad en comparación con las frías capas profundas (hipolimnion).

Llega un momento en que se establece una zona que separa las aguas superficiales, menos densas, de las profundas, más densas. Esa capa, la termoclina, limita el movimiento vertical de los organismos y la difusión del oxígeno y otras sustancias disueltas. Durante esa época, si las cantidades de biomasa generada durante la primavera son excesivas, el oxígeno acumulado en el hipolimnion será consumido por la descomposición de la biomasa. La reducción del oxígeno del hipolimnion se denomina déficit hipolimnético; constituye una medida de la cantidad de materia orgánica que ha sido reciclada. Valores bajos o nulos de este parámetro dan paso a la formación de iones reducidos, amonio, sulfhídrico, metano y metales pesados disueltos; ello hace disminuir la calidad del agua y puede dar lugar a mortandades de peces cuando se producen episodios de mezcla.

Ratio de calidad ecológica

Hasta la fecha, la mayoría de los índices de calidad de agua se basaban en escalas numéricas absolutas, calibradas para las regiones o sistemas que sirvieron de modelo para el desarrollo de los mismos. Imaginemos ahora la situación de la península Ibérica, con clima mediterráneo y condiciones de semiaridez y comparémosla con algún país báltico, donde las precipitaciones de lluvia y nieve proporcionan gran cantidad de recursos hídricos de buena calidad. ¿Tendría sentido utilizar el mismo criterio para calificar la calidad de un embalse situado en uno de esos países y otro español? Evidentemente, no.

Debe hallarse otro modo de clasificar la calidad del agua, sin que sea necesario referirse a una escala absoluta. La solución: utilizar un patrón propio para cada región. Y eso es exactamente lo que se indica en la Directiva Marco del Agua. Para conocer cuál será el estado ecológico de un embalse, compararemos su potencial ecológico con el potencial de la masa de agua que sirve de referencia al grupo al cual pertenece. El resultado de esta comparación es el ratio de calidad ecológica (RCE).

A una masa de agua similar en todo a la masa de agua de referencia le corresponderá un ratio de calidad ecológica de 1. Conforme nos alejemos de ese valor, mayor será la degradación del sistema y mayor el número de medidas correctivas necesarias para llegar a su estado óptimo.

Entre el 0 y el 1 se han establecido cuatro categorías de estado ecológico: malo (por debajo de 0,3), regular (hasta 0,5), aceptable

FACTORES QUE DETERMINAN EL POTENCIAL ECOLOGICO

	Elementos de calidad	Parámetros
Biológicos	Composición, abundancia y biomasa de fitoplancton	Clorofila A total
		Clorofila A de cianófitos
	Composición, abundancia y edad de la fauna piscícola	Anomalías
		Carpa litoral (abundancia y porcentaje)
		Carpa limnética (abundancia y porcentaje)
Físico-químicos	Transparencia	Disco de Secchi
	Condiciones de oxigenación	Oxígeno hipolimnético
	Condiciones de nutrientes	Fósforo total



ENRIQUE NAVARRO, EMILI GARCIA BERTHOU Y JOAN ARMENGOL

4. EL EMBALSE DE LA BAELLS (Barcelona) se halla en el tramo alto del río Llobregat. Durante largo tiempo fue un lugar indicado para la pesca de diversas especies (trucha, lucio, lucioperca y carpa). La introducción del siluro ha provocado la desaparición de algunas de esas especies.



5. EL ALBURNO (*Alburnus alburnus*) es uno de los peces más frecuentes y abundantes en los pantanos españoles. Se trata de un ciprínido europeo, introducido durante los últimos años en los ríos ibéricos.

(hasta 0,7), bueno y muy bueno (por encima de 0,7). Al llegar el 2015, salvo excepciones justificadas, todas las masas de agua deberán encontrarse en la categoría superior o, lo que es lo mismo, en un valor de RCE igual o superior 0,7.

Progresan adecuadamente

Seis de los embalses estudiados presentan un ratio de calidad ecológica "muy bueno". Escales y Canelles son embalses con aguas limpias, que reciben de ríos cercanos al Pirineo, situados en cuencas con una baja densidad de población. Los otros tres son embalses con ciertas particularidades. Santa Fe del Montseny presenta un caso de distrofia. Aunque se halla en una zona montañosa (sin impacto humano), recibe una enorme carga de hojas de la cuenca caducifolia del río que lo alimenta; su tamaño reducido y las bajas temperaturas del agua favorecen la acumulación de biomasa en el fondo, que constantemente libera nutrientes. Dado que no es posible mejorar su estado ecológico (a menos que nos planteemos cambiar el bosque que lo rodea o eliminar la presa), ha sido necesario clasificarlo en su propio tipo, el II, y, además, proponerlo como referente.

La situación es muy distinta en Flix y Riba-Roja. Estos embalses forman parte del sistema triple Mequinenza/Riba-Roja/Flix. Mequinenza retiene buena parte del fósforo. Riba-Roja recibe, además, los aportes de aguas relativamente limpias de los ríos Segre y Cinca. Así, cuando las aguas llegan a Flix (el menor de los tres en capacidad, de ahí el bajo tiempo de retención), su calidad es bastante buena para tratarse de un embalse próximo a la desembocadura del Ebro, uno de los principales ríos de la península. El pantano de Siurana se halla cerca de la costa, en una cuenca agrícola aunque con una baja densidad de población. Constituye el referente de su tipo, por lo que presenta una RCE de 1.

Diez embalses entran en la categoría de "buenos": los situados en ríos cuya cuenca soporta una densidad de población baja (Camarasa, La Baells, Boadella, Santa Ana, Sant Antoni y Sant Ponç), los que se encuentran en tramos altos de ríos (La Llosa del Cavall), los que tienen cuencas pequeñas (Siurana) y los que guardan semejanza con el modelo referente.

Este punto requiere una aclaración. Entre los pantanos mejor estudiados de España se encuentran los de Sau y Susqueda, monitorizados desde hace más de 45 años. Estos embalses se hallan en el tramo medio de la cuenca del río Ter, que sufre una intensa actividad industrial, agrícola y ganadera.

Hace unos años comenzó la implantación de un plan general de saneamiento y depuración de las aguas residuales en la cuenca del Ter; ello ha provocado un descenso en la carga de nutrientes aportada, que se ha traducido en una mejoría notable de ambos embalses. Para esos dos embalses (de tipo V) se ha creado un modelo experto de referencia. El modelo presenta valores esperables para Sau y Susqueda, que podrán alcanzarse durante los próximos años gracias a la ejecución del plan de saneamiento antes citado.

Necesitan mejorar

Los embalses que deben mejorar antes de 2015 forman un grupo de cinco. En esta categoría encontramos el de Rialb, que se halla todavía en proceso de "digestión" de la materia orgánica. Los embalses de reciente creación y que se encuentran en sus primeras fases de llenado deben descomponer toda la materia orgánica

6. FOIX (Tarragona) es uno de los embalses en peor estado, debido a las elevadas cargas de nutrientes que aportan las aguas del río Foix y a la proliferación de algas tóxicas. El castillo de Castellet (s. x) domina el paisaje.



ENRIQUE NAVARRO, EMILI GARCIA BERTHOU Y JOAN ARMENGOL

(vegetal) que ha quedado sumergida bajo sus aguas. Este proceso provoca un incremento de la cantidad de nutrientes disponibles en sus aguas y conduce a un estado que no se corresponde con la buena calidad de las aguas de los ríos que los alimentan. Es de esperar que esos pantanos mejoren sin intervención directa.

Otro embalse que, pese a hallarse en tramos superiores de un río, presenta una calidad "aceptable", es el de Oliana. Recibe aportes de aguas residuales insuficientemente tratadas, lo que explica su estado trófico. Sólo un pantano merece la calificación de "regular": el de Foix. Se trata de un embalse hipereutrófico, con valores elevadísimos de clorofila y abundantes episodios de anoxia pese a su reducida profundidad. Sus problemas se deben a la intensa actividad agrícola que se lleva a cabo en su cuenca y a la llegada de aguas residuales poco tratadas.

Conclusiones

Dado que la inclusión de un embalse en uno u otro tipo podía alterar los objetivos de calidad que deben alcanzarse en el grupo en cuestión, la creación de los tipos constituyó un punto básico de este estudio. Si el embalse de referencia fuera mucho mejor que el resto del grupo, los objetivos de mejora de la calidad serían inalcanzables en el plazo de tiempo que indica la Directiva, lo que además acarrearía costes sociales, económicos y ambientales intolerables para las cuencas afectadas. De ahí que las presas más afectadas por la actividad humana y con cuencas hidrográficas grandes o muy grandes se hayan clasificado en grupos aparte.

El uso de índices implica siempre un compromiso entre la información que recogen y la que descartan, por lo que debemos asumir desde el inicio sus limitaciones. Con todo, dada la magnitud del trabajo al que se enfrentan las administraciones, se impone su uso. Un punto básico será la selección adecuada de parámetros fiables y fáciles de obtener, que reflejen el estado general del sistema. Otro punto importante será la intercalibración de esos índices entre los países de la Unión Europea.

El sistema propuesto por la Directiva, sin ser una solución absoluta al problema del agua, armonizará el trabajo de catalogación y control de todas las masas de agua europeas, lo que permitirá mejorar la protección y gestión de este limitado recurso del que tan mal uso hacemos.

Los autores quieren agradecer a las siguientes personas su colaboración durante el proyecto: M. Bacardí, L. Benejam, L. Caputo, J. Carol, C. Feijoo, M. A. Gallegos, M. Granell, J. Ordoñez e I. Reyes.

Bibliografía complementaria

LIMNOLOGIA DE LOS EMBALSES ESPAÑOLES. R. Margalef, D. Planas, J. Armengol, A. Vidal, N. Prat, A. Guiset, J. Toja y M. Estrada. Dirección General de Obras Hidráulicas. MOPU; Madrid, 1976.

LIMNOLOGIA. R. Margalef. Ed. Omega; Barcelona, 1983.

THE EFFECTS OF LIMNOLOGICAL FEATURES ON FISH ASSEMBLAGES OF 14 SPANISH RESERVOIRS. J. Carol, L. Benejam, C. Alcaraz, A. Vila-Gispert, L. Zamora, E. Navarro, J. Armengol, E. García-Berthou en *Ecology Of Freshwater Fish*, vol. 15, págs. 66-77; 2006.

ECOLOGICAL CLASSIFICATION OF A SET OF MEDITERRANEAN RESERVOIRS APPLYING THE EU WATER FRAMEWORK DIRECTIVE: A REASONABLE COMPROMISE BETWEEN SCIENCE AND MANAGEMENT. E. Navarro, L. Caputo, R. Marçé, J. Carol, L. Benejam, E. García-Berthou y J. Armengol en *Lake and Reservoir Management*, vol. 25, n.º 4, págs. 364-376; 2009.

Curvas cáusticas en la porcelana

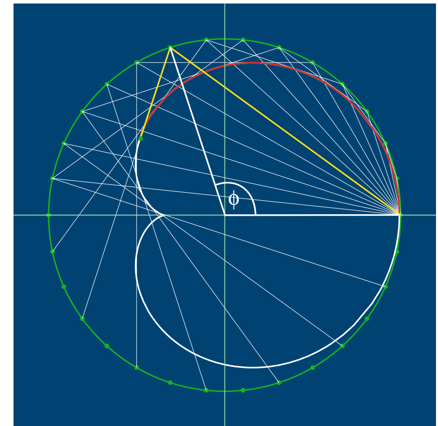
Que la luz siga una línea recta o se desplace por un recorrido curvo ficticio da lo mismo si la curva es una cáustica

Norbert Treitz

Tiempo atrás, en esta misma sección, les hablé de las cáusticas, esas extrañas curvas luminosas que se podían observar sobre la superficie del café cuando el Sol iluminaba la taza justo antes de su ocaso [*véase* "La curva del corazón", diciembre de 2008]. La curva es, a su vez, el corte de la superficie del café con una superficie —curvada— de alta luminosidad: la que siempre emerge de la parte interior de una superficie reflectante iluminada. Que esta superficie focal se encoja y quede en un solo punto (el punto focal) es un caso excepcional.

Cuando la superficie reflectante tiene una sección transversal circular —por ejemplo, cuando se trata de un trozo de esfera o de cilindro huecos—, se obtienen cardioides y nefroides, dos cáusticas especiales que pertenecen a una clase mayor de curvas, las epicicloides; mi artículo de noviembre de 2009 ("Las cicloides y el conjunto de Mandelbrot") describía cómo se las puede generar sin luz, gracias a ruedas que giran unas sobre otras.

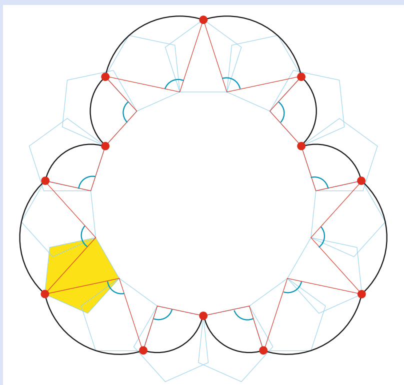
La cuestión de la igualdad de fases —que ya desarrollé en noviembre para los dos focos de una elipse— ha de quedar clara también para las epicicloides. Las cáusticas no son tan luminosas porque concentren gran cantidad de rayos de luz; así ocurre también, más o menos, en toda la zona interior de un espejo hueco. Tampoco porque los rayos reflejados sean, en conjunto, tangentes de la cáustica. Mucho más decisivo es que la luz incida a lo largo de estas tangentes con la misma fase. Por tal razón, las ondas de luz que se encuentran "in-

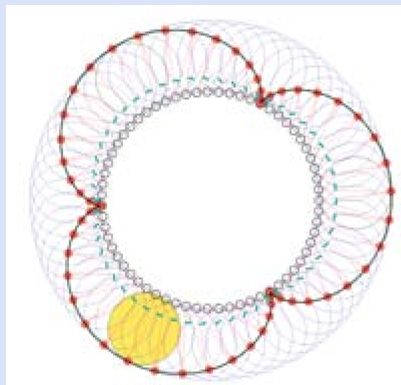


1. Para cada punto de la cardioide se cumple que el recorrido de la luz desde una fuente puntual a su derecha hasta su punto de contacto con la curva (*amarillo*) es igual de largo que el recorrido entre esos dos mismos puntos, aunque por la cardioide (*rojo*): (8/3)sen(ϕ/2).

UN CALCULO DE CURVAS PUNTIAGUDO

Para calcular la longitud de una epicicloide, dejemos que rueden uno sobre otro, no círculos lisos, sino polígonos regulares (de igual arista); consideremos el recorrido que traza uno de sus móviles vértices. Para una epicicloide k veces simétrica (con el orden $m = k + 1$), ruede un n-ágono exteriormente sobre un (kn)-ágono. En la imagen de la izquierda $n = 5$ y $k = 3$; con $n = 21$ (*a la derecha*), el resultado es mucho más redondo. Se trata de kn arcos de circunferencia (contabilizado el arco de longitud cero, para el cual la esquina considerada no se mueve en absoluto). Su centro es, a su vez, un vértice del polígono fijo, y el radio, una "diagonal" del polígono móvil (donde por "diagonal", a diferencia del uso habitual de la palabra, se debe entender cualquier segmento de vértice a vértice, incluyendo la arista de una esquina a su esquina vecina y el segmento nulo que une a una esquina consigo misma). Para n tendiendo a infinito, este recorrido se acerca a una epicicloide.

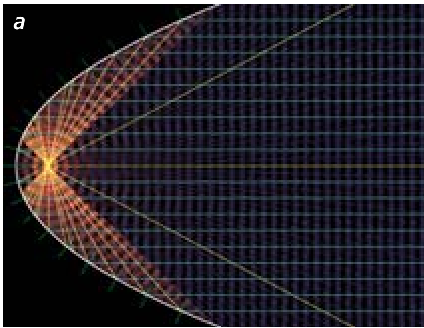


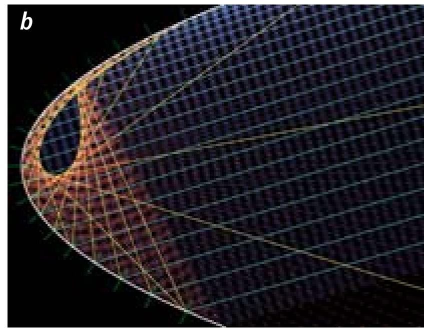


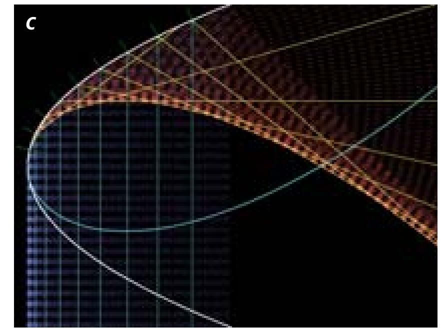
El ángulo de giro de cada arco es siempre el mismo, esto es, igual al ángulo completo 2π menos los ángulos interiores $\pi - 2\pi/n$ y $\pi - 2\pi/(nk)$ de ambos polígonos; esto da $2\pi(k + 1)/(nk)$. Así pues, la longitud total de la epicicloide aproximada es igual a este ángulo por el número de radios implicados, es decir, $2\pi(k + 1)$ por el valor medio d de estos radios. Las "diagonales" en el n-ágono toman los valores $2r\,\mathrm{sen}(j\pi/n)$ para j desde 0 hasta n, donde r designa el radio de la circunferencia circunscrita.

Ahora dejemos que n tienda a infinito: los polígonos tendrán cada vez más vértices y se asemejarán más a un círculo. El valor medio d tiende (excepto un factor de escala) a la integral de la función seno desde 0 hasta π; se obtiene $d = 2/\pi$. Como el radio de la circunferencia circunscrita del polígono fijo es igual a kr, obtenemos para la longitud total de la epicicloide el valor $8R(k + 1)/k$. Maravillosamente, el factor π se ha simplificado.

Este cálculo también funciona para hipocicloides.







2. La luz paralela en un espejo parabólico (paraboloide o cilindro con el mismo perfil) genera, según el ángulo de incidencia, un foco (*a*) o una cáustica (*b*), que en el caso extremo de que la luz incidente sea perpendicular al eje dará la mitad de una cúbica de Tschirnhaus (*c*; *la otra mitad se ha complementado en azul claro*).

finitesimalmente cerca", en vez de anularse mutuamente, se intensifican.

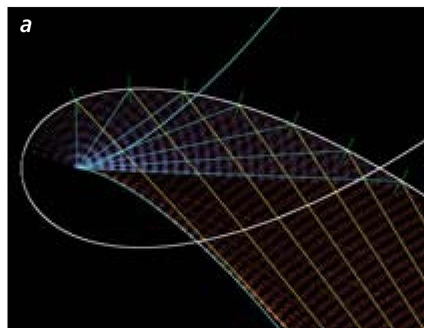
La cardioide goza de otra propiedad peculiar más. La longitud del recorrido, rectilíneo pero quebrado, de un rayo de luz que parte del borde circular, se refleja en ese mismo borde y llega a un punto de contacto con la cáustica es igual a la del recorrido curvo entre esos mismos puntos de partida y de contacto, a lo largo de la cáustica (*figura 1*).

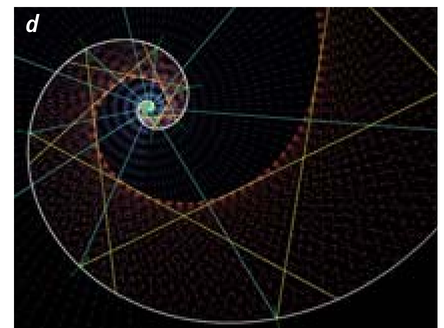
Calcular la longitud de una curva es, en general, incómodo. Hay que hacer la integral de la raíz de la suma de los cuadrados de las derivadas de la función que describe la curva. Transformar para una curva concreta esa fórmula en una expresión algebraica manejable requiere los trucos más refinados, y no siempre se consigue encontrarlos. Por eso hay que echar mano de razonamientos poco convencionales que sólo resolverán casos particulares, eso sí, elegantemente. En el caso de la epicicloide, se llega a un resultado aproximándose a la redonda lisura de los círculos con la aspereza puntiaguda de los polígonos (*véase el recuadro*).

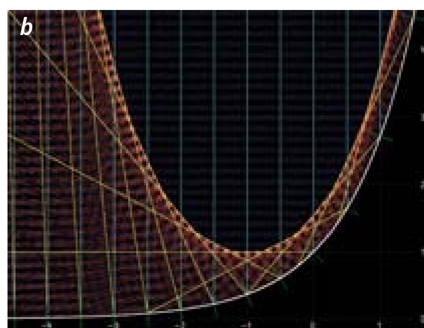
En la cardioide, toda la maleza de integrales y raíces se resuelve satisfactoriamente gracias a la siguiente identidad: $1 + \cos\phi = 2\cos^2\phi/2$; resulta, pues, posible comprobar con la voluminosa fórmula estándar que el recorrido curvo y el rectilíneo quebrado miden igual. Para las otras cáusticas, se comprueba la equivalencia de los recorridos gracias a mis simulaciones por ordenador. (Yo soy físico experimental...)

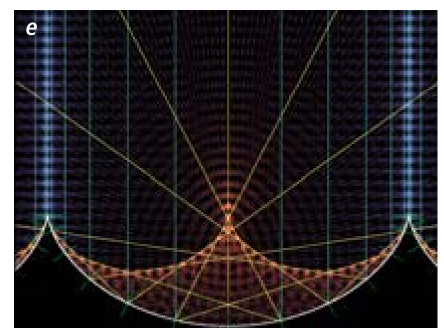
La cúbica de Tschirnhaus

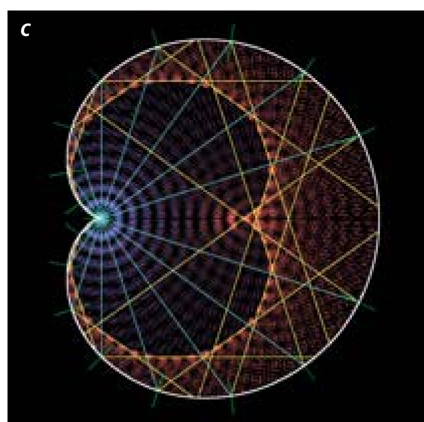
Volvamos otra vez a los espejos huecos y recordemos que el paraboloide de rotación tiene un punto focal exacto. Teóricamente, ese punto focal no debe ser mucho mayor que la longitud de onda. Pero se trata de un caso excepcional: que la luz incida paralelamente al eje. En











3. La cáustica de (media) cúbica de Tschirnhaus es (media) parábola de Neil, donde la fuente de luz se encuentra situada en el centro del círculo de curvatura del vértice (*a*). De la curva de la función exponencial $y = \exp x$ se obtiene, con luz paralela desde arriba, la catenaria $y = \cosh(x + 1)$ (*b*). De la cardioide con una fuente de luz puntual en la cúspide, una nefroide (*c*). De una espiral logarítmica con fuente de luz en el centro, una versión girada de sí misma (*d*). Y de una cicloide común con luz paralela desde arriba, una versión de sí misma reducida a la mitad (*e*).

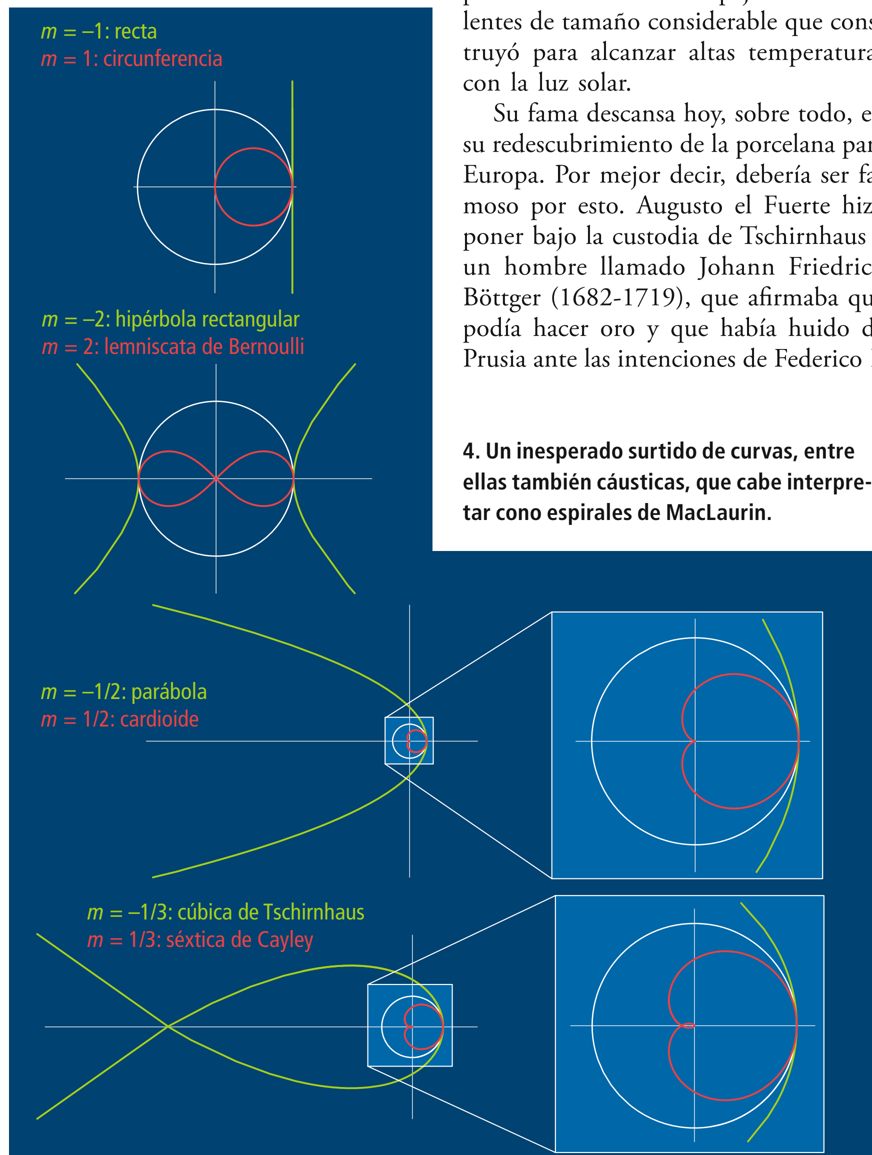
NORBERT TREITZ/*Spektrum der Wissenschaft*

cuanto las ondas inciden con alguna inclinación, en vez de un punto focal aparecerá una cáustica dispuesta alrededor del foco, como si deliberadamente evitase tocarlo; sin embargo, sí toca el lugar bajo el foco donde se esperaría un punto imagen.

Ahora bien, si exageramos la inclinación y hacemos que la luz incida perpendicularmente al eje —por ejemplo, desde abajo sobre medio espejo parabólico—, resultará una curva que ha recibido muchos nombres, ya que diferentes autores la han vuelto a descubrir en contextos distintos: cúbica de l'Hôpital (por Guillaume de l'Hôpital, 1661-1704, más conocido por una regla para calcular límites); trisectriz de Catalan (por Eugène Catalan, 1814-1894, al que la posteridad principalmente conoce por la conjetura de Catalan, demostrada hace bien poco); y en el año 1900, en honor de Ehrenfried Walther von Tschirnhaus (1651-1708), se la llamó "cúbica de Tschirnhaus". Por una vieja forma de construir el genitivo en alemán, muchos creyeron que el nombre era "Tschirnhausen". Como esta inexactitud se vuelve a encontrar en una cantidad enorme de páginas web, se recomienda introducir también "Tschirnhausen" si se quiere efectuar una búsqueda en Internet al respecto.

Tschirnhaus era cultísimo y mantenía correspondencia con sabios de la talla de Spinoza, Huygens y Newton, y, sobre todo, con Leibniz. Fue el primer alemán que perteneció como miembro extranjero a la Academia de Ciencias francesa. En la sala físico-matemática del palacio Zwinger de Dresde, así como en museos de Múnich y Kassel, se pueden contemplar con asombro los espejos ustorios y lentes de tamaño considerable que construyó para alcanzar altas temperaturas con la luz solar.

Su fama descansa hoy, sobre todo, en su redescubrimiento de la porcelana para Europa. Por mejor decir, debería ser famoso por esto. Augusto el Fuerte hizo poner bajo la custodia de Tschirnhaus a un hombre llamado Johann Friedrich Böttger (1682-1719), que afirmaba que podía hacer oro y que había huido de Prusia ante las intenciones de Federico I.



4. Un inesperado surtido de curvas, entre ellas también cáusticas, que cabe interpretar cono espirales de MacLaurin.



5. Ehrenfried Walther von Tschirnhaus, aparte de otras muchas cosas, descubrió una curva que aparece como cáustica en el espejo parabólico.

Poco antes de morir, Tschirnhaus fabricó una taza de porcelana, pero le fue sustraída en un robo. Böttger tomó nota y se dedicó él mismo a la fabricación de porcelana. Tanto éxito tuvo, que todavía hoy sigue siendo para muchos, aunque injustificadamente, el descubridor (claro está, en Europa) de la porcelana.

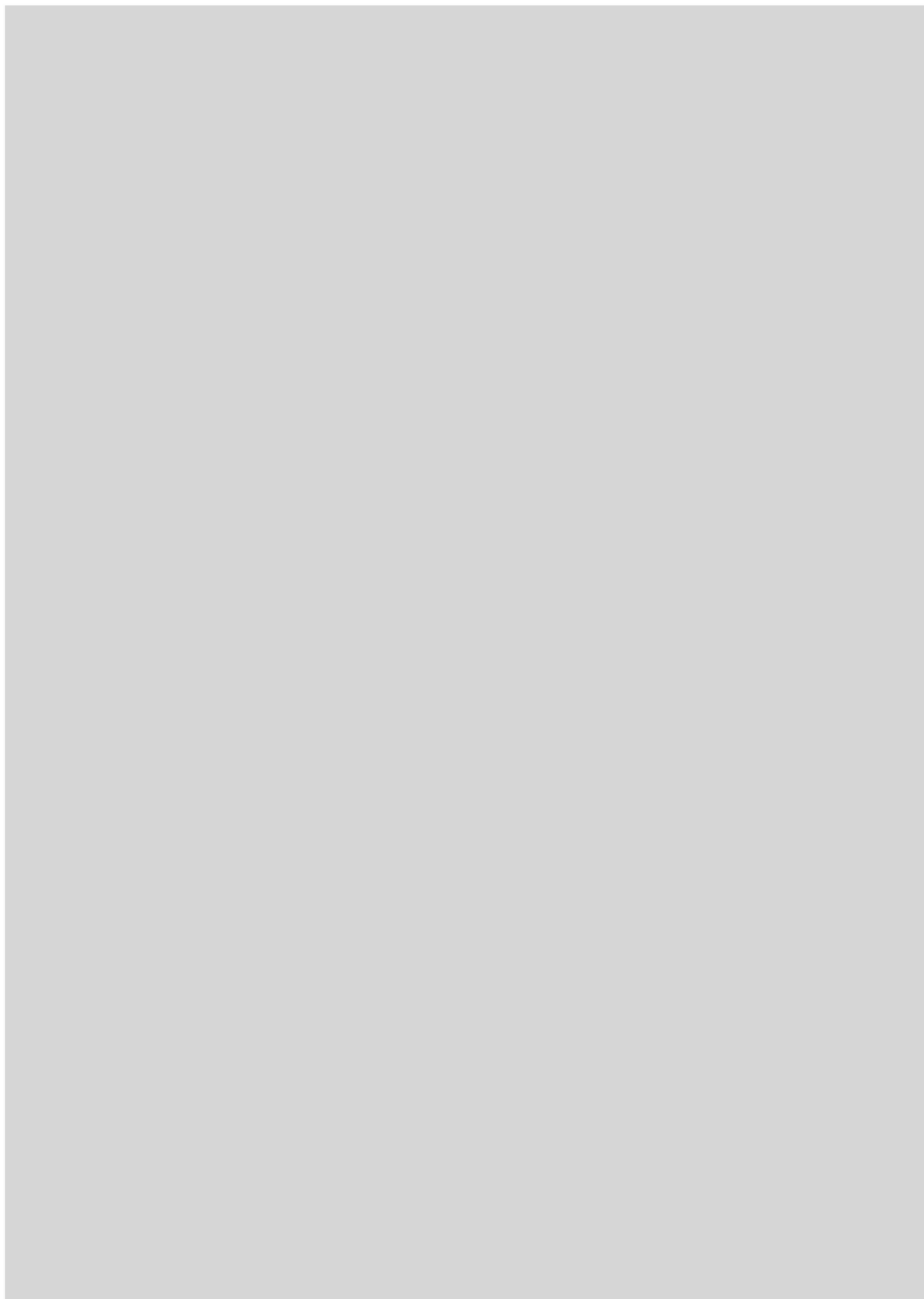
Espirales sinusoidales de MacLaurin

¿Cuál es la cáustica de una cáustica? La luz que ilumina una curva desde un punto o paralelamente desde la lejanía saca a luz, literalmente, una abundancia de relaciones sorprendentes (*figura 3*). La cáustica de la cáustica de la taza de café para una luz puntual es la cáustica de la taza de café para luz paralela. La curva de la función exponencial genera de forma maravillosa una suma de sí misma y su imagen especular: un coseno hiperbólico. Y la espiral logarítmica hasta se reproduce a sí misma, con un giro.

Al fin y al cabo, muchas cáusticas, y otras curvas, caben en una misma fórmula:

$$r^m = r_0^m \cos (m\phi)$$

que describe de qué modo depende r —la distancia al origen— del ángulo ϕ (*figura 4*). Colin MacLaurin (1698-1746) investigó esta clase de curvas (las "espirales sinusoidales"). Un cambio de signo en m corresponde a una inversión en el círculo de radio uno [*véase* "Antiparalelogramos, ruedas y émbolos", mayo 2008].



Ladrillos, candados y progresiones

El fabuloso mundo de los números primos

Agustín Rayo

No hay nada más hermoso que un número primo; el 19, por ejemplo, o el 101, o el 512.927.357, o el $2^{43.112.609} - 1$.

Lo que distingue a los números primos de los números naturales comunes y corrientes es que tienen exactamente dos divisores: 1 y ellos mismos. El número 7, por ejemplo, es primo porque los únicos números que lo dividen (sin resto) son el 1 y el 7. El número 12, en cambio, no es primo porque puede ser dividido (sin resto) por el 2, el 3, el 4 y el 6, además del 1 y el 12. (El número 1 no cuenta como primo porque tiene un solo divisor: él mismo.)

Los números primos son tan hermosos porque son las piezas básicas —los ladrillos— a partir de las cuales están construidos todos los números naturales mayores que 1. El número 6, por ejemplo, está construido a partir de los primos 2 y 3 (porque 6 = 2 × 3), y el número 12 está construido a partir de dos copias del 2 y una del 3 (porque 12 = 2 × 2 × 3) (*véase la ilustración*). (El teorema fundamental de la aritmética es una versión precisa de esta idea; nos dice que todo número natural mayor que 1 tiene una descomposición única en números primos.)

Criptografía

Supongamos que usted y yo nos vemos obligados a comunicarnos a través de un mensajero. Sabemos que el mensajero entregará nuestros mensajes, pero no queremos que descubra sus contenidos. ¿Cómo podríamos evitar que nuestra información caiga en manos del mensajero? Una manera de hacerlo sería ponernos de acuerdo para utilizar un código secreto: un código que conozcamos nosotros, pero no el mensajero.

Este método funciona siempre y cuando podamos reunirnos sin que esté presente el mensajero para decidir qué código secreto utilizar. Pero supongamos que no tenemos manera de ponernos de acuerdo de antemano. Toda nuestra correspondencia —incluida la correspondencia en la que nos ponemos de acuerdo acerca de cómo transmitir nuestros secretos— pasará a través del mensajero. ¿Hay alguna manera de mantener seguros nuestros secretos?

He aquí un método posible. Yo voy a la tienda y me compro un candado. Me quedo con la llave, y le mando a usted el candado abierto, junto con una nota solicitándole que ponga su mensaje en una caja y asegure la caja con el candado. Aun cuando el mensajero se entere de todo lo que está sucediendo, nuestro secreto estará seguro, porque una vez que el candado esté cerrado, sólo yo podré abrirlo.

Los números primos nos dan una manera de obtener resultados similares sin tener que ir a la ferretería. El método del candado funciona porque los candados gozan de una asimetría: son fáciles de cerrar, aunque difíciles de abrir. Pues resulta que los números primos también gozan de una cierta asimetría. Es fácil multiplicar números primos para obtener un número compuesto, pero a la fecha no se conoce ningún método eficiente para descomponer un número compuesto en los primos que lo constituyen.

Esto hace posible que usted y yo aseguremos nuestros secretos utilizando el método siguiente. Yo escojo dos números primos p y q, y me cercioro de que sean grandes. (Se conocen métodos eficientes para hacer esto.) El resultado de multiplicar p y q será nuestro 'candado'. Le mando a usted ese número a través del mensajero, junto con instrucciones acerca de cómo codificar su mensaje secreto sobre la base del 'candado'. Con el proceso de codificación correcto, el mensaje sólo podrá ser decodificado por quien tenga la 'llave': un número que puede ser derivado eficientemente por quien conozca p y q, pero no por quien conozca sólo el producto. Si el mensajero estuviera en posición de descomponer el candado en p y q, se hallaría capacitado para dar con la llave. Pero cuando p y q son suficientemente grandes, no se conoce ninguna manera de hacerlo en un tiempo razonable.

Muchos de los métodos criptográficos que se utilizan hoy en día —y, en particular, muchos de los que se utilizan para transmitir información de manera segura a través de Internet— están basados en variaciones de esta idea.

Un nuevo resultado sobre números primos

A pesar de su papel fundamental en la teoría de números —y de su importancia práctica— se sabe sorprendentemente poco acerca de los números primos.

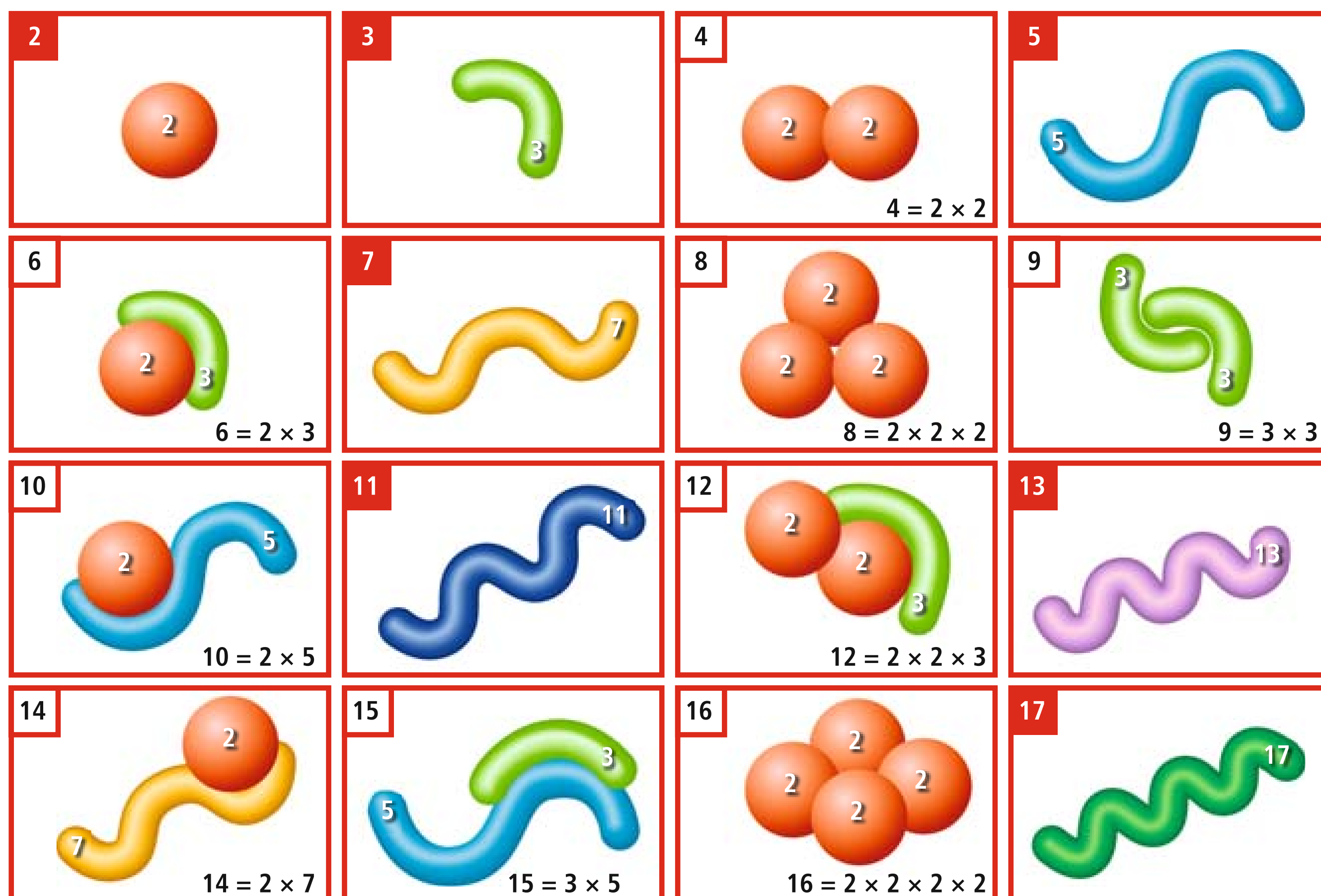
Algo que sí sabemos es que la secuencia de números primos es infinita. (*Prueba:* Supongamos que la secuencia de primos es finita: $p_1, p_2, ..., p_k$. Entonces existe un número $P = p_1 \times p_2 \times ... \times p_k$, que resulta de multiplicar a todos los números primos. Pero el número $P + 1$ tiene que ser primo. Si no lo fuera, tendría que poderse dividir entre uno de los $p_1, p_2, ..., p_k$, pero ningún número mayor que 1 puede dividir a un número y su sucesor. Hemos, pues, encontrado un número primo mayor que $p_1, p_2, ..., p_k$, contradiciendo el supuesto de que todos los primos están en $p_1, p_2, ..., p_k$.)

Otra cosa que sabemos es que los primos son cada vez más escasos. El teorema de los números primos nos dice que

¿Quiere saber más?

Un método criptográfico basado en las ideas que describí arriba es el RSA. (Se llama así, por los nombres de sus autores: Ron Rivest, Adi Shamir y Leonard Adleman.) Aunque hay métodos más elaborados, el RSA es especialmente elegante y fácil de describir. Hay una buena discusión en <http://es.wikipedia.org/wiki/RSA>.

Ben Green escribió una nota breve en la que explica las ideas fundamentales detrás de su teorema. Puede encontrarse en <http://smf.emath.fr/en/Publications/Gazette/2007/112/smf_gazette_112_26-27.pdf>.



Los números primos son los ladrillos a partir de los cuales están construidos los números naturales mayores que 1.

cuanto mayor sea N, menor será la proporción de primos entre 1 y N. Por ejemplo, el 40 % de los números entre 1 y 10 son primos, pero sólo el 25 % de los números entre 1 y 100 son primos, y sólo el 16,8 % de los números entre 1 y 1000 son primos. (En el caso general, la proporción de números entre 1 y N que son primos es aproximadamente $1/\ln(N)$, donde $\ln(N)$ es el 'logaritmo natural' de N, es decir, el número x tal que $N = e^x$.) Sabemos también que hay límites a cuán grande puede ser una secuencia de números sin contener al menos un número primo. El teorema de Bertrand-Chebyshev implica que, para todo N mayor que 1, hay al menos un número primo entre N y $2N$.

Por desgracia, no sabemos mucho más. Se desconoce si hay infinitos 'primos gemelos' (es decir, números p y $p + 2$, tales que ambos son primos). También se desconoce si todo número par mayor que 2 es la suma de dos primos. Este problema, denominado conjetura de Goldbach, ha estado abierto desde 1742, cuando el matemático prusiano Christian Goldbach le escribió a Euler sugiriendo que podría ser verdad. En julio del 2008, Tomás Oliveira e Silva utilizó un programa de cómputo para mostrar que la conjetura es verdad para cualquier número menor que 12×10^{17}, pero nadie ha conseguido demostrar que no podría haber algún número mayor a 12×10^{17} que no sea la suma de dos primos. (Si a usted se le ocurre alguna manera de probar alguna de estas conjeturas —y si tiene menos de 40 años— seguramente sería honrado con una Medalla Fields, el más alto honor que un matemático puede recibir.)

En vista de lo poco que se sabe sobre la distribución de los números primos, cada nuevo resultado es motivo de alegría. Y en 2004 Ben Green (profesor de la Universidad de Cambridge) y Terry Tao (profesor de la Universidad de California en Los Angeles, y ganador de la Medalla Fields) probaron un teorema fabuloso.

Digamos que una 'progresión' de números primos es una secuencia de primos tal que miembros consecutivos de la secuencia están siempre igualmente espaciados. La secuencia de primos 5, 11, 17, 23, 29, por ejemplo, es una progresión porque la diferencia entre un número y su sucesor es siempre 6. (En mayo de 2009, Raanan Chermoni y Jaroslaw Wroblewski utilizaron un programa de cómputo para encontrar una progresión de 25 números primos: $6.171.054.912.832.631 + 366.384 \times 223.092.870 \times n$, para n de 0 a 24. Que yo sepa, nadie ha logrado identificar una progresión de más de 25 números primos.)

El resultado de Green y Tao es que, *dado cualquier número N*, existe una progresión de números primos de al menos tamaño N. Existe, por ejemplo, una progresión de al menos $10^{10^{10^{10}}}$ números primos, aunque nadie haya logrado identificarla. (El teorema nos asegura que existen progresiones de primos de longitudes arbitrariamente grandes, pero no nos da un método eficiente para construirlas.)

Pocas veces se encuentra uno con un resultado tan hermoso.

Agustín Rayo es profesor de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.



ARABIC INTO LATIN IN THE MIDDLE AGES. THE TRANSLATION AND THEIR INTELLECTUAL AND SOCIAL CONTEXT,

por Charles Burnett. Ahsgate; Farnham, 2009.



LE MONDE VEGETAL. MEDECINE, BOTANIQUE, SYMBOLIQUE.

Edición preparada por Agostino Paravicini Bagliani. Sismel, Edizioni del Galluzzo; Florencia, 2009.

Ciencia medieval

La botánica como guía

Acostumbrados a considerar la ciencia medieval polarizada en la astronomía, suele pasarse por alto que el motor último de la misma estuvo en una vuelta a la razón de las cosas (*Arabic into Latin in the Middle Ages*). En lo primero, España aportó su grano de arena. Hacia finales del siglo x, el noreste peninsular manejaba el astrolabio y, por ende, la astronomía. Aparecieron allí por entonces los numerales indoarábigos y el juego del ajedrez (de origen árabe también). La aparición de los astrolabios latinos (así el Destombes) coincide en el tiempo con la renovación del cultivo andalusí de la ciencia del firmamento en el seno de la escuela de Maslama al-Majriti, quien preparó una tabla estelar en 978. Una coincidencia que entraña, en realidad, una relación de dependencia.

Los primeros textos latinos comprenden traducciones de materiales árabes sobre la construcción y empleo del astrolabio (*De mensura astrolapsus* y *Sententie astrolabii*) y reelaboraciones latinas de ese mismo material. En los albores intervino de manera destacada también la abadía benedictina de Saint Benoit de Fleury, de fama reconocida, y cuyas obras revelan una innegable afición al cómputo y la astronomía. Probablemente las primeras palabras árabes en una poesía latina que un público occidental oyera serían las de los versos iniciales de Fulbert, obispo de Chartres (1006-28), versos encaminados a la memorización de las estrellas fijas que se añadieron a la *rete* del astrolabio. Las estrellas en cuestión (Aldebarán, Calbalazet, etcétera) eran algunas de las más brillantes del firmamento y le permitían al observador localizar las coordenadas celestes.

Entre 960 y 1050 se gestó una auténtica biblioteca que, si omitimos las obras traducidas del griego en la Antigüedad o de origen puramente latino (Hyginus, Aratus, Calcidius, Firmicus, Maternus, Martianus Capella, Pseudo-Hipparcus, Isidoro, Beda, etcétera), estaría engrosada por versiones latinas de material árabe (*De mensura astrolapsus*, *Sententie astrolabii*, *De horologio secundum alchoram*), adaptaciones (*De mensura astrolabii, De utilitatibus astrolabii*, *Geometria incerti auctoris*) y con formación de un nuevo *corpus* (*De mensura astrolabii, De utilitatibus astrolabii* y *De horologio viatorum*).

Hubo en el siglo undécimo un considerable interés en los *naturalia*, en las cuestiones relativas a la explicación de los fenómenos naturales. De manera prominente, en la Italia meridional. La preocupación se refleja en la abundancia de títulos sobre los elementos, los metales, los alimentos, los aires y las aguas, entre otros. Y parece cada vez más claro que el movimiento por hacerse con la cultura árabe no comenzó con la llegada de Constantino el Africano a Salerno, procedente de Qayrawan, en 1077. La contribución de Constantino fue, sin duda, muy importante y no hay motivos para negarle las traducciones médicas a las que va ligado su nombre. Pero ello no obsta para que algunos de los textos traducidos por Constantino o anónimamente se introdujeran en la Sicilia árabe y en las provincias bizantinas de Italia meridional con anterioridad.

Tal es el origen de la colección de textos médicos conocidos por *Articella*, que en su forma más primitiva no contenía ninguna obra atribuida a Constantino. Dos de esos textos se suponían traducidos de las versiones árabes de Hunayn ibn Isaac; la colección en su conjunto iba precedida por una introducción a la medicina del propio Hunayn: la *Isagoge*. En la Italia meridional del siglo xi, el griego era una lengua conocida, aun cuando la ausencia de manuscritos griegos se paliara con los textos traducidos al árabe.

La colección de libros naturales más antigua es la que se ha dado en llamar *corpus vetustius*, que se fue reuniendo en los primeros decenios del siglo xiii a partir de las traducciones del griego y del árabe. Aportaron a Robert Grossetteste, Petrus Hispanus Portugalensis, Roger Bacon y Alberto Magno su conocimiento de la ciencia natural de Aristóteles. Hacia finales del siglo xiii esta colección cedió paso al *corpus recentius*, en el que las traducciones árabo-latinas del griego fueron sustituidas por las traducciones directas del griego realizadas por Guillermo de Moerbeke. Los *Libri* naturales eran los textos de filosofía natural aristotélica indicados para su enseñanza en las facultades de artes de las universidades europeas.

Los *libri naturales* estaban constituidos por obras genuinas de Aristóteles —*Físicos, De coelo, De generatione et corruptione, Meteora, De anima* y los *Parva naturalia*— así como otras obras atribuidas a Aristóteles, como el *De plantis* de Nicolas Damasceno, el *De mineralibus*, que eran tres capítulos de la *Shifa* de Avicena, y el *De causis*, en realidad un centón de textos tomados de los *Elementos de teología*, de Proclo. Se incluía un texto, no obstante, que no era de Aristóteles en absoluto: *De differentia spiritus et animae* de Qusta ibn Luqa.

Dejémonos guiar por los libros sobre botánica, que recogen todavía numerosos

elementos alquímicos y simbólicos (*Le monde vegetal*). La ilustración busca, también, convertirse en reflejo de la planta al natural. En una importante enciclopedia árabe de mediados del siglo x, el mundo vegetal se evalúa todavía de acuerdo con la escala de las religiones; estructura y cualidad de las plantas suministran un juego complejo de analogías con la religión islámica. La difusión del saber botánico medieval se funda sobre una tradición antigua y compleja (*Agricultura nabatea, De Plantis*) cuyo estudio resulta capital también para entender la ciencia natural. En su versión actual, el tratado pseudoaristotélico *De plantis* parece haber nacido con una finalidad pedagógica.

Traducido del siriaco antiguo al árabe en el siglo x, el *Libro de la agricultura nabatea* no se limita a los cultivos, el cuidado y aplicación de las plantas descritas y clasificadas detalladamente, sino que incluye también temas de orden filosófico y científico. Se admite que fue compuesto por tres autores (Sagrit, Yanbusad y Qutama), que vivieron en épocas muy distintas. La imposibilidad de acotar con precisión su identidad y su contexto histórico no ha impedido darle cierta ubicación, que nos remite a los ambientes siriacos de los siglo III-V de la era cristiana.

La obra destaca las razones que hacen posible la intervención del hombre sobre la naturaleza con el fin de mejorar las cosechas; en particular, la alteración del curso acostumbrado de la naturaleza para generar nuevas especies o bien mejorar las mismas especies ya existentes. Un motivo ulterior de interés es la extensión al reino animal de las posibilidades ratificadas en el reino vegetal, amparándose en la "unidad de la creación", que significa, en este contexto, unidad del principio vital y unidad de la materia corpórea.

El *Libro de la agricultura nabatea* plantea el problema de saber si se halla en el origen de la conexión entre agricultura y alquimia. Si bien la alquimia no constituía un objeto explícito del tratado representa la principal clave de lectura de las cuestiones filosóficas. La alquimia está vinculada a la alquimia árabe, en particular la que remonta a Gabir ibn Hayyan (del siglo IX). No debe extrañarnos que el traductor árabe de *Agricultura nabatea* sea Ibn Wahsiya, de tendencia hermética y perteneciente a la escuela de Gabir. La presencia del tema del arte de transformar la naturaleza con el fin de su perfeccionamiento culmina en la producción artificial de seres vivos; en la alquimia transformar o reformar la naturaleza no es más que perfeccionarla. Otros aspectos característicos del arte alquimista representados contemplan los procesos de putrefacción y combustión y la centralidad a ellos atribuida por las dinámicas de transformación. La putrefacción se produce por la humedad de las aguas y por el calor del sol y del aire.

Se ha perdido el original del *De plantis* pseudoaristotélico. El que manejamos hoy es la retroversión griega de una versión latina de una versión árabe de un texto traducido también al hebreo y al siriaco; en total, cinco traducciones de una obra cuya narración original se desconoce. Ignoramos también si la fuente era un tratado, un comentario o un epítome. Aunque tal como aparece, diríase que se trata de un comentario, si bien funde tesis procedentes de Aristóteles con otras de Teofrasto, en un género que recuerda el comentario o epítome. En Oriente, se atribuyó la autoría a Nicolás de Damasco, peripatético nacido hacia el 64 y muerto posiblemente en Roma, conocido por haber escrito un compendio de filosofía aristotélica. En el ámbito árabe era reconocida su atracción por la filosofía natural, de la que el *De plantis* sería una prueba. Del texto se apropiaron, no obstante, los autores de lengua árabe. De autor en autor, de siglo en siglo, la historia llega hacia el año 1200, cuando el maestro Alfredo de Sareshel decide traducirlo del árabe al latín. En ese momento Occidente entró en posesión de la obra. (Del *De plantis* habría existido una traducción latina más antigua, anterior a la versión traducida al siriaco.)

El tema central, la animación o alma vegetativa, se desarrolla con modalidades metodológicas típicamente aristotélicas y con referencias a más contextos de las obras del corpus. En la botánica de Teofrasto, esa cuestión no se aborda. Como todo organismo, las plantas poseen alma, nutritiva. El vegetal ocupaba un espacio intermedio entre lo inerte y lo animado. Las plantas constan de un número indeterminado de partes, que merecen un estudio pormenorizado. Se acomete aquí la multiplicidad y variedad de las partes, su inconstancia, distribución en los distintos tipos de plantas y correlación con la capacidad reproductora. Se insiste en la existencia de múltiples planos de diferencias entre las partes (por tipo o especie, por el modo de presentarse, por las características cuantitativas y cualitativas, etcétera), para subrayar la dificultad de acotar la naturaleza o esencia.



Detalle vegetal de la catedral de Reims.

El libro segundo del *De plantis* versa sobre naturaleza y nutrición de los vegetales. En su naturaleza se identifican tres *vires* (propiedades o cualidades) conexas a los tres elementos componentes: tierra, de la cual depende su carácter fijista; agua, de la cual depende su solidez, y fuego, del cual depende su consistencia compacta. En la naturaleza de las plantas predomina, pues, el frío y lo seco, atemperado por la presencia de cierto grado de humedad. Por lo que concierne a la nutrición, las plantas absorben su ingesta por la fuerza de "atracción", que su componente terroso ejerce sobre la humedad. El proceso de nutrición es aumentativo.

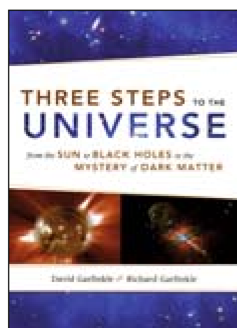
Dos son las cosas indispensables para la generación de una planta: materia para el "crecimiento" y un lugar próvido. De modo más pormenorizado, se requieren cuatro factores: semilla determinada, lugar adecuado, agua en cantidad moderada y aire templado. Las plantas pueden generarse y crecer de una semilla, de "humedad putrefacta" (sedimento húmedo), del agua, del enterramiento o de otra planta. En ese último caso, la planta parásita encuentra en la planta huésped una humedad residual (un suelo de crecimiento) suficiente para su nacimiento, y cuya evaporación por el sol inducía la cocción (*pepsis*). Por otro lado, el alma vegetativa es infinita e indeterminada en su función, habida cuenta de su evidente capacidad de germinar y propagarse ulteriormente.

Para adentrarse en la atmósfera naturalista que rodea al alma vegetativa, nada más indicado que examinar los comentarios del siglo XIII al *De anima* y, en particular, a la forma en que fue recibido

Aristóteles en el mundo latino. Aristóteles apenas si se extiende en la exposición de los caracteres del alma vegetativa. En el *De anima* II.2 precisa que existen muchas maneras de entender la vida y que basta que una de ellas se realice en un individuo para que se le reconozca como ser vivo: intelecto, sensación, el movimiento y reposo según el lugar o incluso el movimiento que implica la nutrición. Las plantas pertenecen a la clase de seres vivos porque poseen una facultad y un principio (*dynamis, arché*) que les permite ascender y decrecer en sentidos opuestos (hacia arriba y hacia abajo simultáneamente), mientras dispongan de alimento. Esa facultad puede existir con independencia de las otras, mientras que las facultades más complejas no pueden existir al margen de ésta. Existe una continua oscilación de denominaciones entre facultad vegetativa y potencia nutrititiva.

Uno de los puntos más interesantes del estudio de los comentarios medievales al *De anima*, impregnados a su vez de naturalismo, se encuentra representado por el problema de las potencias del alma humana y de las relaciones que mantienen entre sí. Según Aristóteles, la facultad de rango inferior, como la facultad vegetativa o nutritiva, está contenida en la facultad de rango superior. Al tratarse de una potencia (*vis, virtus*) que puede subsistir de manera autónoma, y que confiere al ser vivo su especificidad, en el caso de los vegetales el alma se nos presenta como tal principio sustancial que opera, en primer lugar, la nutrición y la reproducción. En su *Liber de anima seu Sextus de naturalibus*, Avicena sostiene que el alma vegetativa no constituye una entidad separada, sino que está integrada en la unidad vital del todo y gobierna hasta cierto punto el alma sensitiva, provocando la inclinación hacia una acción más que hacia otra.

—Luis Alonso



THREE STEPS TO THE UNIVERSE,

por David Garfinkle y Richard Garfinkle. The University of Chicago Press; Chicago, 2008.

La astrofísica

Cómo sabemos lo que sabemos

La astrofísica, como ciencia, cuenta apenas un siglo. Para dar una explicación cabal de los procesos por los que liberan energía las estrellas, saber las distancias que nos separan de las galaxias o cuantificar la edad del universo, es necesario recurrir a la mecánica cuántica, la relatividad, finas observaciones y laboriosos cálculos por ordenador. El cuadro que resulta es bastante conocido, quizá porque su espectacularidad se brinda a una exposición llamativa. Las estrellas queman hidrógeno cual las bombas termonucleares (aunque a ritmo más lento). El Sol es una estrella normal y corriente, de las que en nuestra galaxia hay unos cuatrocientos mil millones. El universo observable (cien mil millones de años luz de diámetro, en números redondos) puede contener unos cien mil millones de galaxias, de las cuales la Vía Láctea es una más. Y se está expandiendo, en un proceso que comenzó hace unos 14.000 millones de años con la gran explosión, o *Big Bang*.

Es oportuno establecer una distinción entre esos conocimientos y los relatos míticos. Cabe el peligro —real, pues de hecho se da— de meter en el mismo saco la ciencia y otras explicaciones de la realidad, valorándolas con el mismo rasero. Lo cual es injusto, pues el método científico *funciona*. Con eso se quiere señalar que el saber adquirido tiene consecuencias comprobables y se puede utilizar, o sea, permite interactuar con la naturaleza de manera racional y fiable. El problema apuntado se agrava porque la ciencia ha adquirido tal grado de sofisticación que es difícil para el lego no sólo estar al tanto de los avances de la ciencia, sino también comprender los cimientos del método que asegura ese saber. La divulgación de calidad es clave en esta tesitura.

Se han reseñado aquí varios libros que tratan sobre astrofísica y cosmología, sobre el mundo en que vivimos contemplado a la mayor escala que somos capaces de abarcar. La particularidad de este que reseñamos aquí radica en el empeño por esclarecer los fundamentos del conocimiento científico: los datos, las observaciones, los razonamientos. Los autores no eluden las cuestiones más arduas ni ahorran esfuerzos por aclarar detalles que otros hubieran esquivado. En cada página del libro late la pregunta: “¿Y cómo se sabe que eso es así?” Logran responder a esa interpelación consistentemente y de manera accesible en cada encrucijada del discurso, sin aparato matemático complicado, sin hacer uso de nociones impenetrables ni de conceptos físicos enigmáticos. Todo, además, con un estilo ameno y ligero.

El libro se estructura en tres capítulos, los tres pasos a que hace referencia el título. Primero se explica qué es una estrella: su composición, sus características, cómo consume su combustible en reacciones nucleares. A continuación, se considera la vida y la muerte de las estrellas: su clasificación, la evolución que sufren a lo largo de su existencia, lo que les ocurre cuando agotan sus reservas, el rescoldo que dejan al apagarse (en particular, se describe lo que es un agujero negro). Luego se examina lo que sabemos de la historia del universo, desde teorías asentadas (como la de la gran explosión) hasta los interrogantes que los científicos intentan dilucidar actualmente (qué pueden ser la materia oscura y la energía oscura). En el caso de cuestiones debatidas o de asuntos inciertos, se exponen como tales sin ambages. Acaba la obra con una breve apología del método científico, tomando como paradigma la astrofísica.

A lo largo de la narración, grata e inspirada, se excita muchas veces la curiosidad del lector y se proporcionan explicaciones en las que nunca falta el rigor, pero sin que resulten abrumadoras o tediosas. Son doscientas cincuenta páginas que pueden hacer las delicias de quien desee adentrarse en este apasionante rincón de la cultura de modo llevadero y sin la exigencia de una formación científica.

—Angel Garcimartín

EN EL PROXIMO NUMERO DE MARZO 2010



Vida en el multiverso,

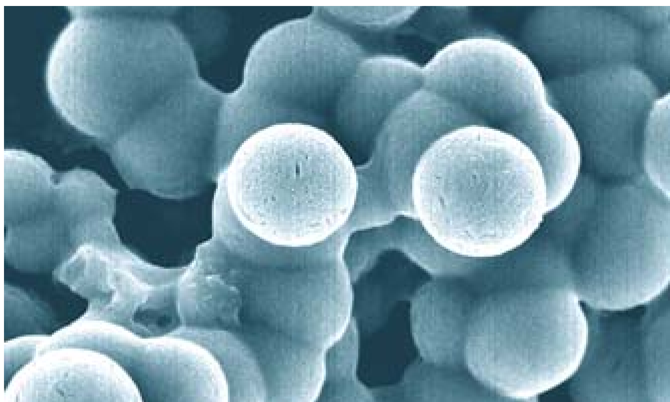
por Alejandro Jenkins y Gilad Perez

Otros universos con distintas leyes físicas podrían albergar vida.

Auge y caída de las nanobacterias,

por John D. Young y Jan Martel

Antaño consideradas patógenos, estas extrañas partículas desempeñan una función en la salud, pero no la que se las atribuía.





Guerra nuclear local, sufrimiento global,

por Alan Robock y Owen Brian Toon

Los temores se han concentrado en el enfrentamiento entre EE.UU. y Rusia, pero una guerra nuclear regional entre India y Pakistán oscurecería el sol y mataría de hambre a buena parte de la población mundial.

El futuro de los microchips,

la redacción

El retroceso de los límites del diseño permite obtener circuitos integrados cada vez más diminutos, veloces y económicos.

El enigma de Osborne Reynolds,

por Alvaro Meseguer y Fernando Mellibovsky

Aunque se sigue desconociendo por qué un fluido conducido por una tubería se vuelve turbulento, se ha dado un paso importante hacia la resolución del problema, formulado hace ya más de 125 años.

